

## Resum

En aquest projecte l'objectiu és desenvolupar un model de cavitació en un Venturi que proporcioni uns resultats similars als experimentals. Els càlculs es realitzen amb un software de Mecànica de Fluids Computacional (CFD) i es desenvoluparà un model que es validarà amb resultats experimentals d'un cas de referència.

S'inicia el projecte amb un aprenentatge específic de tècniques de simulació computacional. Per a la realització de les simulacions inicials, es tenen en compte les condicions obtingudes de forma experimental per tal de poder simular de forma correcta el fenomen de cavitació comparant amb els documents gràfics prèviament obtinguts.

Per a optimitzar els recursos dels sistemes de càlcul i del programa emprat (CFX) es realitza un estudi de sensibilitat de la malla respecte a uns paràmetres de referència fixats, aquests seran la pressió a la entrada del Venturi, la pressió de sortida i la velocitat màxima del fluid. D'aquesta manera s'aconsegueix obtenir una malla suficientment acurada amb el mínim d'elements possibles per a facilitar els càlculs posteriors.

El domini emprat depèn directament dels resultats de les simulacions i la capacitat del nostre model a convergir cap a una solució estable. S'aplica l'estudi d'un domini el més petit possible sense que aquest influeixi en el comportament del sistema.

Es duen a terme 5 casos de simulació diferents: a pressió màxima sense cavitació, pressió alta amb cavitació curta, pressió mitja amb cavitació intermèdia, pressió baixa amb cavitació llarga i pressió mínima amb cavitació màxima. Tots aquest escenaris s'han reproduït experimental amb anterioritat a la realització del projecte. Per a la simulació en CFX s'ha emprat la cavitació com a model de transferència de massa. Més concretament, s'ha utilitzat el model Rayleigh Plesset, en el que s'ha fixat una pressió de saturació de l'aigua a 25° i a partir de la qual, per a valor més baixos de pressió, es produirà cavitació.

Amb la modificació de la pressió de sortida del domini es varien les condicions de contorn del sistema i es reproduïx l'estela de vapor generada per la cavitació en els diferents casos i els quals queden validats en base a les fotografies adquirides al laboratori.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>7</b>
1.1. Abreviatures	7
1.2. Nomenclatura	7
<b>2. PREFACI</b>	<b>9</b>
2.1. Origen del projecte	9
2.2. Motivació	9
2.3. Requeriments previs	9
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>11</b>
3.1. Objectius generals projecte	11
3.2. Abast del projecte	11
<b>4. CONCEPTES TEÒRICS DEL PROJECTE</b>	<b>12</b>
4.1. Conceptes bàsics de la hidrodinàmica	12
4.1.1. Definició de fluid	13
4.1.2. Propietats dels fluids	13
4.1.3. Tipus de fluxos	15
4.1.3.1. Fluxos estacionaris o no estacionaris	15
4.1.3.2. Fluxos compressibles i incompressibles	16
4.1.3.3. Flux laminar i turbulent	16
4.2. Fluxos entorn de cossos	17
4.2.1. Tècniques bàsiques per a l'anàlisi de fluxos	17
4.2.2. Bernoulli	19
4.2.3. Flux en conductes no circulars	20
4.2.4. Capa límit	21
4.3. Conceptes específics del projecte	23
4.3.1 Principi de Venturi	23
4.3.1.1. Tub Venturi	24
4.3.1.2. Efecte Venturi	25
4.3.2. Cavitació	29
4.4. Definició del model numèric	31

4.4.1.	Introducció al CFD .....	31
4.4.2.	Discretització del domini .....	32
4.4.3.	Equacions resoltes pel programa .....	33
4.4.4.	Model de cavitació .....	34
4.4.5.	Model de turbulència .....	36
<b>5.</b>	<b>MODEL NUMÈRIC CFD .....</b>	<b>38</b>
5.1.	Creació de la geometria .....	38
5.2.	Creació de la Malla .....	39
5.3.	Models de simulació .....	44
5.3.1.	Transferència de calor .....	44
5.3.2.	Turbulència prop de les parets .....	44
5.3.3.	Casos d'estudi i paràmetres de simulació .....	46
5.3.4.	Simulació del cas sense cavitació. ....	47
5.3.4.1.	Condicions de contorn i càlcul de solució.....	47
5.3.5.	Simulació casos amb cavitació .....	51
5.3.5.1.	Condicions de contorn i càlcul de solució.....	51
5.3.5.1.1	Pressió màxima sense cavitació.....	52
5.3.5.1.2	Pressió alta amb cavitació curta.....	55
5.3.5.1.3	Pressió mitja amb cavitació intermèdia.....	59
5.3.5.1.4	Pressió baixa amb cavitació llarga.....	63
5.3.5.1.5	Pressió mínima amb cavitació màxima.....	67
<b>6.</b>	<b>COMPARACIÓ I DISCUSSIÓ DE RESULTATS .....</b>	<b>72</b>
<b>7.</b>	<b>PROGRAMACIÓ .....</b>	<b>75</b>
<b>8.</b>	<b>PRESSUPOST .....</b>	<b>77</b>
8.1.	Costos directes .....	77
8.2.	Costos indirectes imputables.....	78
8.3.	Costos total del projecte .....	78

<b>9. IMPACTE MEDIAMBIENTAL</b>	<b>80</b>
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>82</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>84</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>85</b>
Referències bibliogràfiques .....	85



# 1. Glossari

## 1.1. Abreviatures

*CFD: Computational Fluid Dynamics (Mecànica Computacional de Fluids)*

*CAD: Computer-Aided Design (Disseny assistit per ordinador)*

*CAE: Computer-Aided Engineering*

*EIA: Estudi d'Impacte Ambiental*

*SST: Shear Stress Transport*

*CFX: Software de CFD d'ANSYS*

## 1.2. Nomenclatura

$z$ : Alçada del fluid (m)

$A$ : Àrea ( $m^2$ )

$Q$ : Cabal ( $m^3/s$ )

$k$ : Compressibilitat (Pa)

$\rho$ : Densitat ( $kg/m^3$ )

$\beta$ : Derivada respecte la massa (m) d'una propietat del sistema (B) o propietat específica

$y^+$  o  $Y_{plus}$ : Distància a la paret adimensional, dins la capa límit (adimensional)

$\delta^+$ : Desplaçament línies de corrent (mm)

$D_h$ = Diàmetre hidràulic

$T$ : Esforç tallant (Pa)

$\dot{Q}$ : Flux de calor (W)

$\dot{W}$ : Flux de potència (W)

$g$ : Gravetat ( $9,81 \text{ m/s}^2$ )

$G_s$ : Gravetat específica o densitat relativa ( $\rho_{\text{material}} / \rho_{\text{aigua}}$ )

$Ca$ : Nombre de cavitació (adimensional)

$Ma$ : Nombre de Mach (adimensional)

$Re$ : Nombre de Reynolds (adimensional)

$\gamma$ : Pes específic ( $\text{kg/m}^2\text{s}^2$ )

$P_{\text{din}}$ : Pressió dinàmica (Pa)

$P_{\text{est}}$ : Pressió estàtica (Pa)

$P_v$ : Pressió de vapor (Pa)

$\sigma$ : Tensió superficial ( $\text{kg/s}^2$ )

$n$ : Vector perpendicular a la superfície (adimensional)

$u$ : velocitat del fluid (m/s)

$a$ : velocitat del so (m/s)

$\mu$ : Viscositat dinàmica ( $\text{kg/(ms)}$ )

$V_e$ : Volum específic ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )



## **2. Prefaci**

### **2.1. Origen del projecte**

La meua experiència personal amb la assignatura de mecànica de fluids em va despertar un gran interès per aquest tipus de problemàtica com és la cavitació. A més, vaig tenir la oportunitat de familiaritzar-me amb els programes de simulació com el Fluent o el CFX, fet que sumat amb les inquietuds prèviament comentades, van fer que el projecte que se'm va plantejar fos molt interessant per a mi.

### **2.2. Motivació**

Tenir la possibilitat de simular situacions de la vida real a partir d'un software va cridar-me molt la atenció. La necessitat de conèixer els comportaments d'infinits sistemes amb múltiples variables sense haver d'experimentar-ho físicament resulta avui en dia completament indispensable. Proporciona la capacitat de conèixer de manera ràpida les accions mecàniques i aerodinàmiques a la que es sotmet l'objecte d'estudi degut a accions externes abans de crear-lo.

També cal dir que les dues branques que sustenten aquest projecte que son el CAD (Computer-Aided Design) i el CAE (Computer-Aided Engineering) em fascinen i prèviament contava amb certa experiència. Després d'endinsar-me en aquest treball i gràcies a l'ajuda del meu tutor he arribat a adquirir una quantitat de coneixements en un curt període de temps, que no hagués pogut aprendre en condicions normals.

### **2.3. Requeriments previs**

Per dur a terme aquest treball és indispensable disposar de coneixements previs en Mecànica de Fluids per a poder entendre els conceptes que envolten tot el projecte. Tal i com ja s'ha esmentat, és imprescindible estar dotat d'experiència amb software CAD i CAE per a la realització de simulacions. No és menys important tenir coneixements sobre gestió de projectes per tal de realitzar una bona organització del treball i la viabilitat d'aquest.



## **3. Introducció**

### **3.1. Objectius generals projecte**

L'objectiu d'aquest projecte és arribar a simular el fenomen de la cavitació partint d'un tub Venturi. A partir d'aquest escenari, es tractarà de generar un model computacional amb el software de simulació CFX que permeti reproduir els resultats obtinguts experimentalment en un laboratori. Aquest estudi és necessari degut a la dificultat de reproduir amb precisió aquests fenòmens que no són estacionaris, i per tant, que compten amb un grau de dificultat afegit a l'hora de convergir en una solució. La complexitat del treball residirà en la capacitat de definir un domini amb unes condicions de contorn adients per a la conseqüent simulació.

### **3.2. Abast del projecte**

L'estudi que es realitzarà en aquest projecte correspon a una simulació 2D, que degut a la simetria del venturi ens permetrà extrapolar els resultats per a un model 3D sense necessitat de simular un domini en tres dimensions i la dificultat extra que comporta. Per començar, s'ha decidit fer una simulació estacionària amb la intenció d'obtenir uns resultats estables i, per tant, no sigui necessari la realització d'un estudi transitori. Inicialment, es fa un estudi del comportament del fluid a través del Venturi sense activar el model cavitacional Rayleigh Plesset, a partir d'aquí es realitza un primer model de malla el qual s'empra durant tot l'estudi posterior. Un cop s'ha simulat correctament els casos sense cavitació, es passa a l'estudi de tots els altres casos amb el model cavitacional activat. És necessari ser capaç de simular el cas sense cavitació inicialment de forma correcta per, a partir d'aquesta solució, inicialitzar els models amb cavitació. S'observen les diferents pressions d'entrada a les que corresponen cada nivell de cavitació i les fraccions de volum de vapor generat i líquid presents en el domini.

## 4. Conceptes teòrics del projecte

En aquest apartat es defineixen tots els conceptes fonamentals per a entendre i desenvolupar el projecte.

### 4.1. Conceptes bàsics de la hidrodinàmica.

Es defineix com a hidrodinàmica la part hidràulica de la dinàmica dels fluids [1]. Per a l'estudi hidrodinàmic cal considerar 3 aproximacions:

- El fluid és un líquid incompressible, és a dir, la seva densitat no varia amb el canvi de pressió.
- Es considera despreciable la pèrdua d'energia per la viscositat, considerant que aquest és un líquid òptim per a fluir i la pèrdua es negligible envers la inèrcia del moviment.
- El flux del líquid se suposa en règim estable o estacionari, és a dir, que la velocitat en un punt del líquid no és funció del temps.

La hidrodinàmica doncs, té múltiples aplicacions industrials, com el disseny de canals, construcció de ports i preses, fabricació de vaixells, turbines, etc.

Daniel Bernoulli va ser un dels primers matemàtics en realitzar estudis sobre la hidrodinàmica, precisament ell va ser el que va donar nom a aquesta branca de la física amb la seva obra de 1738, Hydrodynamica [2].

#### 4.1.1. Definició de fluid

Un fluid és una substància que es deforma de manera contínua quan és sotmesa a un esforç tallant, sense importar quan petit sigui aquest. Un sòlid, en canvi, és una substància capaç de resistir aquest tipus d'esforços, experimentant una deformació estàtica.

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta A}$$

eq. 4.1

Existeixen dos classes de fluids: líquids i gasos. Un líquid, al estar format per agrupacions de molècules molt properes les unes de les altres amb grans forces de cohesió, tendeixen a conservar el seu volum i formar una superfície lliure en un camp gravitatori si no està limitat per sobre. D'altra banda, com les molècules de gas estan molt separades entre si amb forces de cohesió menyspreables, un gas s'expansiona fins que troba parets que el confinen ja que no té un volum definit.

#### 4.1.2. Propietats dels fluids

Les propietats d'un fluids són aquelles magnituds físiques les quals els seus valors defineixen l'estat en el qual es troba [3].

- Densitat ( $\rho$ ): Es defineix com a massa per unitat de volum. L'aigua pura a pressió atmosfèrica i a 4°C té una densitat de  $10^3 \text{ kg/m}^3$ .
- Volum específic ( $v$ ): És l'invers de la densitat i es defineix com el volum ocupat per unitat de massa del fluid
- Pes específic ( $Pe$ ): És el pes del fluid per unitat de volum. Canvia depenent del lloc degut al valor diferent de l'acceleració g. L'aigua pura a pressió atmosfèrica i a 4°C té un pes específic de  $9,81 \cdot 10^3 \text{ N/m}^3$ .
- Gravetat específica ( $Gs$ ): També s'anomena densitat relativa, i és la relació entre el pes específic d'un volum de fluid i el pes específic del mateix volum d'aigua en condicions estàndard de pressió i temperatura. És una propietat adimensional.

- Viscositat ( $\mu$ ): És la resistència que un fluid oposa a la seva deformació.

$$\tau = \mu \frac{\delta u}{\delta y}$$

Eq.4.2

- Compressibilitat ( $k$ ): És la variació de volum per unitat de volum, dividida per l'increment de pressió que el va originar.

$$K = -V \left( \frac{\partial p}{\partial V} \right)$$

Eq.4.3

- Tensió superficial ( $\sigma$ ) Les molècules al llarg de la superfície lliure del líquid estan sotmeses a una força neta cap a l'interior. Com a conseqüència física d'aquesta força no equilibrada al llarg de la superfície, es crea una "pell" o "membrana". La tensió superficial correspon a la intensitat d'atracció molecular per unitat de longitud.
- Pressió de Vapor ( $P_v$ ): Els líquids s'evaporen degut a que les molècules escapen de la seva superfície. Aquestes molècules exerceixen una pressió parcial a l'espai que els envolta anomenada pressió de vapor. Quan la pressió per sobre d'un líquid és igual a la pressió de vapor d'aquest, es produeix la generació de vapor a temperatures baixes. Aquest fenomen es denomina cavitació i posteriorment es definirà més àmpliament.

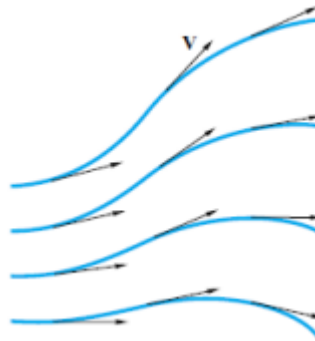
### 4.1.3. Tipus de fluxos

El moviment dels fluids es pot classificar de moltes maneres, segons criteris i segons diferents característiques.

#### 4.1.3.1. Fluxos estacionaris o no estacionaris.

Per a determinar la naturalesa del flux s'ha de tenir en compte com es comporten les seves propietats al llarg del temps, la velocitat, pressió, densitat i temperatura.

Quan aquestes romanen constants al llarg del temps es parla d'un flux estacionari. Per al flux estacionari la velocitat en un punt donat és constant en el temps. Totes les partícules que passin per aquell punt ho faran amb la mateixa velocitat, i la trajectòria d'una partícula del fluid correspon a una línia de corrent que es tangent en cada punt al vector velocitat [4].



*Figura 4.1. Representació de patrons de flux: Línies de corrent*

En el cas de que les propietats del fluid i les característiques mecàniques del mateix es vegin afectades en el temps i no romanguin constants, es parla d'un flux no estacionari. A diferència de l'estacionari, les partícules que passen per un punt ho poden fer a velocitats diferents depenent del temps i, per tant, una partícula pot seguir una línia de corrent en un instant i una diferent a l'instant següent.

#### 4.1.3.2. Fluxos compressibles i incompressibles

En mecànica de fluids, un flux es classifica en compressible i incompressible depenent de la variació de la densitat del fluid durant aquest flux. La incompressibilitat és una aproximació i es diu que el flux es incompressible si la densitat es manté pràcticament constant al llarg de tot el flux. Per tal de conèixer si aquestes variacions sobre la densitat són menyspreables es fa servir el nombre de Mach ( $Ma$ ) [5]:

$$Ma = \frac{u}{a}$$

*Eq.4.4*

El nombre de Mach és adimensional. Aquest relaciona la velocitat local del fluid ( $u$ ) amb la velocitat de so ( $a$ ). Es considera que per a valors de  $Ma > 0,3$  l'efecte de la compressibilitat no ha de ser negligida i, per tant, s'ha de tenir en compte les variacions en la densitat.

#### 4.1.3.3. Flux laminar i turbulent

Quan entre dues partícules en moviment existeix un gradient de velocitats, és a dir que una es mou més ràpid que l'altra, es produeixen forces de fricció que actuen tangencialment a elles mateixes.

Aquestes forces intenten induir una rotació entre les partícules en moviment, però simultàniament la viscositat tracta d'impedir aquest efecte. Depenent del valor relatiu d'aquestes forces trobarem diferents fluxos [6].

Quan el gradient de velocitat és baix, la força d'inèrcia és major que la de fricció, les partícules doncs, es desplacen però no roten. El resultat final és un moviment en el qual les partícules segueixen trajectòries definides, i totes aquelles que passen per un punt segueixen la mateixa trajectòria. Aquest tipus de flux va ser identificat per O.Reynolds i el va denominar: Flux laminar.

Al augmentar el gradient de velocitat s'incrementa la fricció entre partícules veïnes i aquestes adquireixen una energia de rotació apreciable, la viscositat perd el seu efecte, i degut a aquesta rotació les partícules modifiquen la seva trajectòria. Les partícules llavors, xoquen entre sí i canvien de rumb de forma erràtica. Aquest tipus de flux es defineix com: Flux turbulent.



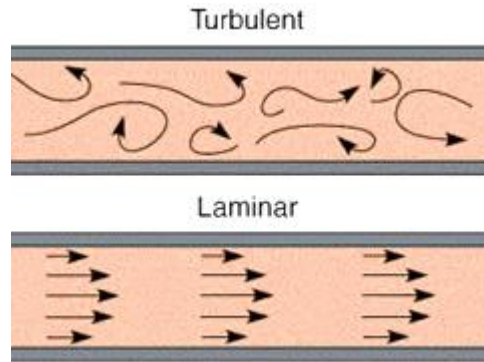


Figura 4.2 Representació del flux laminar i turbulent

## 4.2. Fluxos entorn de cossos

El fluxos al voltant d'un cos presenten efectes de tot tipus, i conseqüentment se'n generen múltiples equacions per permetre l'estudi d'aquests. A continuació es detallen certs conceptes per entendre els principis que es compleixen davant un flux que recorre un volum de control.

### 4.2.1. Tècniques bàsiques per a l'anàlisi de fluxos

El flux, en tots els casos, ha de satisfer les tres lleis de conservació de la mecànica més una relació de estat (termodinàmica) i les condicions inicials i de contorn adients:

- Conservació de la massa (continuitat)
- Conservació de la quantitat de moviment (segona llei de Newton) :

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt}(mV)$$

Eq.4.5

- Conservació de l'energia (primer principi de la termodinàmica) :

$$\dot{Q} - W = \frac{dE}{dt}_{sist}$$

Eq.4.6

- Una relació d'estat :

$$\rho = \rho(p, T).$$

*Eq.4.7*

- Condicions de contorn sobre superfícies sòlides, interfases, entrades i sortides.

Aquestes lleis estan expressades en termes matemàtics i han de ser resoltes mitjançant mètodes numèrics. Es tracta d'equacions diferencials. En un estudi experimental se suposa que el fluid compleix aquestes relacions intrínsecament. O el que és el mateix, que cap fluid és capaç de violar aquestes lleis per tractar-se de lleis fonamentals de la física.

Les tres primeres lleis, anteriorment esmentades, parteixen d'un mateix teorema. El teorema de transport de Reynolds, el qual relaciona la derivada temporal d'una propietat del sistema amb la variació de dita propietat dins d'una regió concreta.

$$\frac{d}{dt}(B_{sist}) = \frac{d}{dt} \left( \int_{sc} \beta \rho dVol \right) + \left( \int_{sc} \beta \rho (V \cdot n) dA \right)$$

*Eq.4.8*

- Conservació de la massa: El Teorema de transport de Reynolds estableix una relació entre les variacions temporals del sistema i les integrals de volum i de superfície del volum de control. En el cas de la conservació de la massa  $B=m$  i  $\beta=dm/dm=1$ . En el cas concret d'un volum de control fix i no deformable i amb flux estacionari o permanent i incompressible, l'equació seria:

$$\int_{sc} \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0$$

*Eq.4.9*

- Conservació de la quantitat de moviment: A la segona Llei de Newton, la propietat que es deriva és la quantitat de moviment  $mV$ . Per tant tenint en compte que en aquest cas  $B=mV$  i  $\beta=dB/dm=V$  i aplicant el Teorema de transport de Reynolds per a un volum de control no deformable i amb flux permanent, s'obté l'equació:

$$\frac{d}{dt}(mV)_{sist} = \sum \vec{F} = \int_{SC} \vec{V} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA$$

Eq.4.10

- Conservació de l'energia: Finalment, s'obté l'última expressió a partir de la aplicació novament del Teorema de transport de Reynolds a la primera Llei de la termodinàmica. En aquest cas, B correspon a l'energia E, i l'energia per unitat de massa correspon a  $\beta=dE/dm=e$ . Per a un volum de control obtenim la següent expressió:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt}_{sist} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} e \rho dV + \int_{CV} e_e \rho_e \vec{V}_e \cdot d\vec{A}_e - \int_{CV} e_i \rho_i \vec{V}_i \cdot d\vec{A}_i$$

Eq.4.11

#### 4.2.2. Bernoulli

Per a l'estudi de fluxos a través d'una corrent infinitesimal s'empra una relació molt utilitzada entre la pressió, la velocitat i l'alçada, aquesta s'anomena equació de Bernoulli. Aquesta està directament relacionada amb l'equació de l'energia per a flux estacionari, que va ser formulada pròpiament per Bernoulli al 1738, tot i que la deducció completa fou de Leonhard Euler al 1755. Aquesta equació compta amb certes restriccions que cal tenir en compte, ja que tots els fluids són viscosos. La correcta utilització d'aquesta equació es realitzarà en regions on la fricció sigui depreciable.

Finalment per a un flux estacionari i incompressible es determina:

$$P + \gamma z + \frac{\rho v^2}{2g} = K$$

*Eq.4.12*

On  $P + \gamma z$  correspon a la pressió estàtica del fluid i  $\rho v^2/2g$  a la pressió dinàmica. La suma d'aquests dos termes roman constant al llarg de la línia de corrent.

#### **4.2.3. Flux en conductes no circulars**

En aquest estudi, la secció del conducte per on circula el fluid no és circular. L'anàlisi del flux desenvolupat és anàloga al de tubs circulars, però compta amb un punt més de complicació a nivell algebraic. En el cas de flux laminar les equacions de continuïtat i quantitat de moviment es resolen de forma exacta. En fluxos turbulents, es pot fer servir el perfil de velocitats logarítmic o el diàmetre hidràulic.

$$D_h = \frac{4A}{P}$$

*Eq.4.13*

On A correspon a l'àrea de la secció transversal i P al perímetre mullat. D'aquesta manera, podem obtenir el nombre de Reynolds el qual permet determinar el tipus de flux el qual s'estudia per tal d'utilitzar les formules de flux laminar o flux turbulent en cada cas.

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu} \quad ; \quad Re = \frac{v_s D}{\nu}$$

*Eqs. 4.14 i 4.15*

Per a la determinació del tipus de flux que es té, es realitza una divisió depenent de la obtenció del nombre de Reynolds anterior:

- $Re < 2300$ : El flux es manté estacionari i es comporta com si estigues format per làmines primes. Flux laminar
- $2300 > Re < 4000$ : El flux pateix petites ondulacions però segueix mantenint una forma de làmines primes. Flux de transició
- $Re > 4000$ : Es caracteritza per un comportament del fluid desordenat, no estacionari i tridimensional. Flux turbulent.

#### 4.2.4. Capa límit

La fricció del fluid viscos sobre la superfície d'un sòlid provoca una tensió de cisallament proporcional al gradient vertical de velocitats. La distribució de velocitats va des de zero, en el punt de contacte amb la superfície, fins la velocitat màxima, per a les zones més allunyades de la superfície. La regió compresa entre ambdós estats s'anomena capa límit. Segons la geometria de la capa límit a l'interior del volum de control, els processos poden ser: de flux intern o flux extern. Entenent per flux intern: canals, tubs.. i per flux extern: corrents marines, caudals de rius...

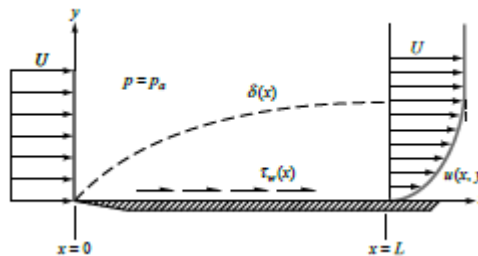


Figura 4.3 Estructura de capa límit

Un altre efecte interessant a tenir en compte és el desplaçament petit, però finit, que s'origina en les lineals de corrent exteriors. Aquestes es deflacten cap a amunt una distància  $\delta^*(x)$  per a que es compleixi la conservació de massa entre la entrada i la sortida.

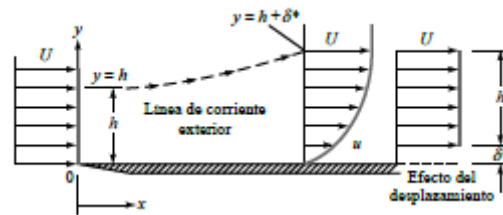


Figura 4.4 Desplaçament de línies de corrent

Depenent del comportament del tipus de capa límit podem diferenciar entre 3 zones: capa límit laminar, turbulenta i regió de transició. La primera es caracteritza per tenir un comportament ordenat on predominen les forces viscoses i, per tant, les capes del fluid llisquen sense efectes de fricció entre elles. La segona presenta un gradient de velocitats gran prop de la paret, el seu comportament no és ordenat, i s'hi formen vòrtex de diferents mides. Cal esmentar que, tot i que en aquesta capa predominen les forces de fricció entre les partícules, a petites distàncies de la paret hi trobem una regió la qual hi predominen les forces viscoses per tal de imposar la velocitat nul·la al punt de contacte amb el conducte. Aquesta zona està formada per una capa laminar, una capa esmorteïdora i una subcapa laminar.

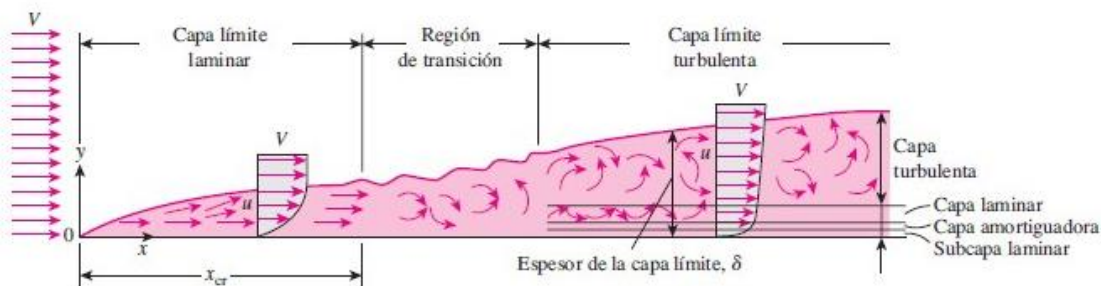


Figura 4.5 Transició de la capa límit

Per últim, és imprescindible parlar sobre el concepte de desprendiment de capa límit. Aquest fenomen es produeix quan es perd la quantitat de moviment del fluid proper a la superfície del cos, fet que va demostrar Prandtl. La causa d'aquest desprendiment resideix en que per sota del fluid es genera un gradient advers de pressions que fa que aquest es desenganxi de la superfície del sòlid. En cas de tenir un gradient de pressions favorable no es produirà mai desprendiment de la capa límit. En el moment del desprendiment de la capa límit, es produeix una estela que resseguirà les línies de corrent del fluid.

Degut a aquest desprendiment es crea una regió de turbulència amb un moviment desordenat del fluid on apareixen vòrtex. El desprendiment d'aquesta capa límit, té lloc més tard si aquesta és turbulenta. Fet que dóna lloc a una estela més petita i a una pressió més alta a la part posterior del cos.

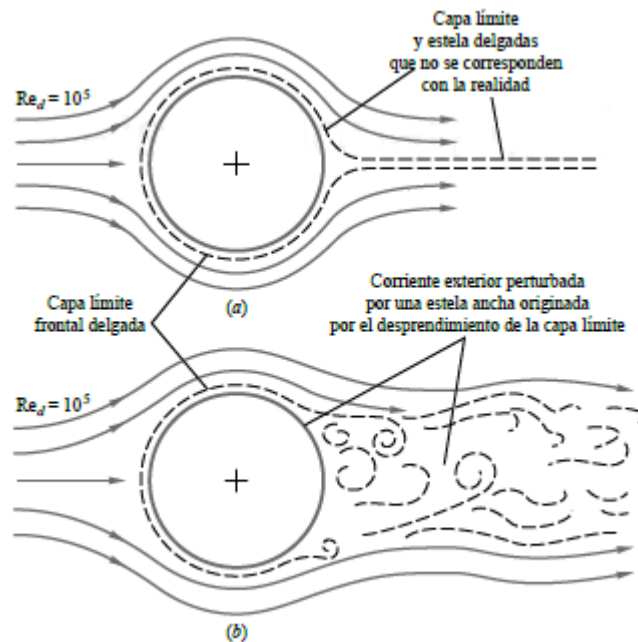


Figura 4.6 Flux entorn un cos i desprendiment de capa límit

### 4.3. Conceptes específics del projecte

Un cop realitzat l'anàlisi dels conceptes més generals de la hidrodinàmica, és necessari aprofundir en alguns detalls que tenen un gran pes en el treball.

#### 4.3.1 Principi de Venturi

Per entendre en que es basa el projecte és indispensable fer referència al concepte de tub de Venturi i l'efecte Venturi. En el cas d'aquest treball, el tub venturi és el domini d'estudi i per tant la geometria per la qual es desplaça el fluid durant la simulació.

#### 4.3.1.1. Tub Venturi

Un tub de Venturi és un dispositiu inicialment concebut per a mesurar la velocitat d'un fluid aprofitant l'efecte Venturi. En el cas particular d'aquest projecte, l'estretament de la secció produeix un augment de la velocitat i la conseqüent caiguda de pressió.

L'aplicació típica de la mesura de velocitat consisteix en un tub format per dues seccions còniques, unides entre si per un tub estret en el qual el fluid es desplaça a major velocitat. La pressió al tub venturi es pot arribar a mesurar per un tub vertical en forma de U, el qual connecta la secció estreta i la secció ampla. La diferència obtinguda entre les dues alçades del líquid permet calcular la pressió en ambdós punts i conseqüentment la velocitat [7].

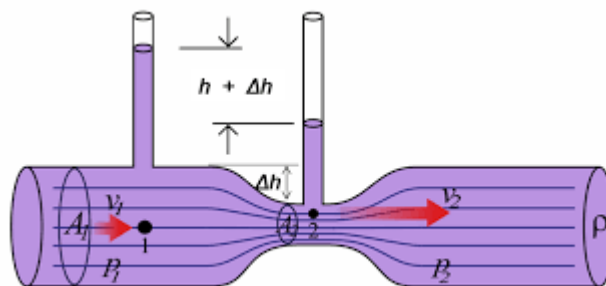


Figura 4.7 Esquema de Tub Venturi

En altres casos, com el d'aquest treball, s'utilitza per accelerar la velocitat d'un fluid obligant-lo a passar per un tub estret amb l'extrem en forma cònica.

La utilització d'aquest dispositiu porta a definir el concepte d'efecte Venturi.



#### 4.3.1.2. Efecte Venturi

Consisteix en un fenomen en el qual un fluid en moviment, dins d'un tub tancat, disminueix la seva pressió quan augmenta la velocitat degut al pas d'aquest per una secció menor. Cal dir que degut a aquest fenomen se'n produeixen conseqüències diverses. En certes condicions, si l'augment de la velocitat és molt gran, es poden arribar a produir pressions negatives i posteriorment un efecte d'aspiració pel fluid en aquest conducte [8].

Amb davallada de la pressió al utilitzar un tub de Venturi s'ha de tenir en compte un fenomen anomenat cavitació. Aquest esdeveniment, és sobre el qual es basa aquest projecte i en el qual profunditzarem més endavant.

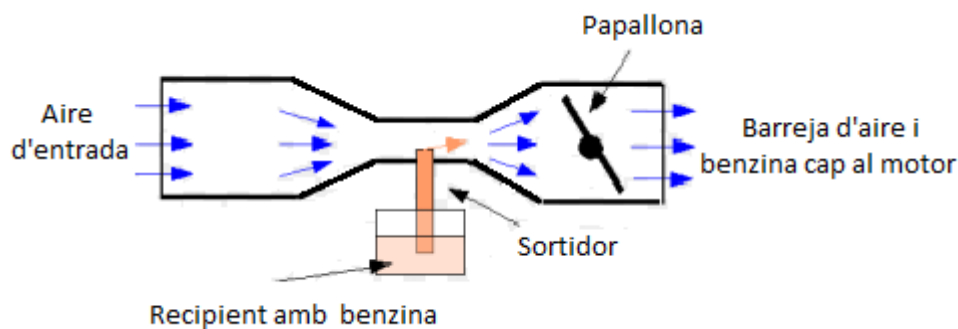
L'efecte Venturi s'explica a partir del Principi de Bernoulli i el principi de continuïtat de la massa. Si el caudal d'un fluid és constant, però la secció disminueix, necessàriament la velocitat augmenta al travessar la secció. Pel teorema de l'energia, si l'energia cinètica augmenta, l'energia determinada per el valor de la pressió disminueix forçosament.

#### 4.3.1.3 Aplicacions del tub Venturi

El tub de Venturi és un dispositiu el qual es pot emprar en múltiples aplicacions tecnològiques i de la vida diària.

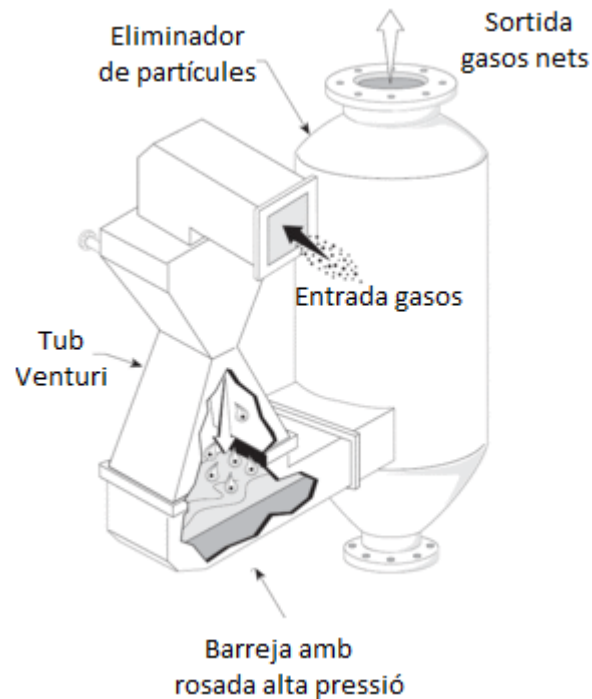
- Indústria automotriu: En el carburador del cotxe, l'ús d'aquest es pot observar en l'alimentació del combustible. Els motors requereixen d'aire i combustible per funcionar. Un litre de gasolina necessita 10000 litres d'aire per cremar-se, i ha d'existir un mecanisme que dosifiqui i permeti l'ingrés de la barreja al motor en una proporció correcta. A aquest dosificador se l'anomena carburador, i treballa a partir del principi de Venturi. Al variar el diàmetre interior de la canonada, augmenta la velocitat de pas de l'aire.

Aquest tub permet la barreja d'aire i combustible per a dur a terme la combustió, sense la qual el cotxe no arrancaria, d'aquí la importància del tub de Venturi en aquesta indústria. En el carburador, la corrent d'aire a gran velocitat provocada pel descens del pistó, alimenta una cuba formant una massa gasosa.



*Figura 4.8 Esquema del efecte Venturi en un carburador*

- Neteja de gasos: El tub Venturi també té altres aplicacions com és la neteja. L'aire urbà normal transporta aproximadament  $1,37 \text{ mg/m}^3$  de matèria en suspensió. La quantitat de pols en l'aire a una planta de fabricació és d'aproximadament  $4,58 \text{ mg/m}^3$ . La quantitat de pols en el gas d'alt forn, després de passar per el captador de pols, és de l'ordre de  $22,9 \text{ g/m}^3$ . L'eliminació de la matèria en suspensió es realitza mitjançant el Venturi de Pease-Anthony. En aquest dispositiu, el gas és forçat a través de la gola del Venturi a barrejar-se amb rosada d'aigua a alta pressió. És necessari un tanc després del Venturi, per tal de refredar i eliminar la humitat. Posteriorment la barreja és filtrada a través de tela de cotó, en el cas de temperatures menors a  $120^\circ\text{C}$ , o tela metàl·lica o de fibra de vidre tupida, en el cas de temperatures altes.



*Figura 4.9* Esquema de neteja de gasos mitjançant Venturi de Pease-Anthony

Mètodes de captació d'energia eòlica: La captació d'energia es pot dividir en dues formes:

- Captació directa: Extreta mitjançant superfícies directament en contacte amb el vent, com els molins de vent.
- Captació indirecta: Aquest mètode utilitza màquines estàtiques, o bé un fluid intermediari. Aquest principi es basa en la utilització d'un tub Venturi que permet, per a una hèlix donada i un vent donat, fer créixer la velocitat de rotació, la potència i el rendiment aerodinàmic per supressió de pèrdues marginals. Per últim també, s'han utilitzat els tubs Venturi per a la modificació de la pressió estàtica i dinàmica. A partir d'un sistema de tubs Venturi en paral·lel que permetin l'elevació de l'aigua.

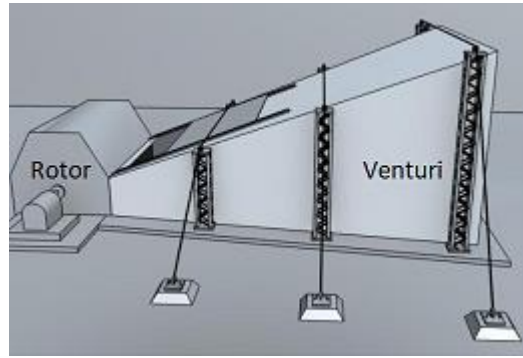


Figura 4.10 Esquema aerogenerador d'alta eficiència

- Barret Venturi: El funcionament d'aquest sistema consisteix en que l'aire calent, que surt per un conducte principal, és arrossegat per l'aire fred que entra quan impacta contra el tub, produint-se així un efecte de buit a l'extrem del conducte. Aquesta acció provoca que el barret de Venturi tingui un alt índex d'efectivitat, la qual es proporcional a la velocitat del vent. Aquest sistema és emprat en zones amb molt vent. El fet que l'aire fred s'acceleri, provoca un descens de la pressió en el corrent d'aire i, per tant, l'aire calent que puja pateix un efecte de succió i és expulsat juntament amb l'aire fred per l'altre banda del conducte. Una aplicació clara seria un barret de ventilació d'una xemeneia.

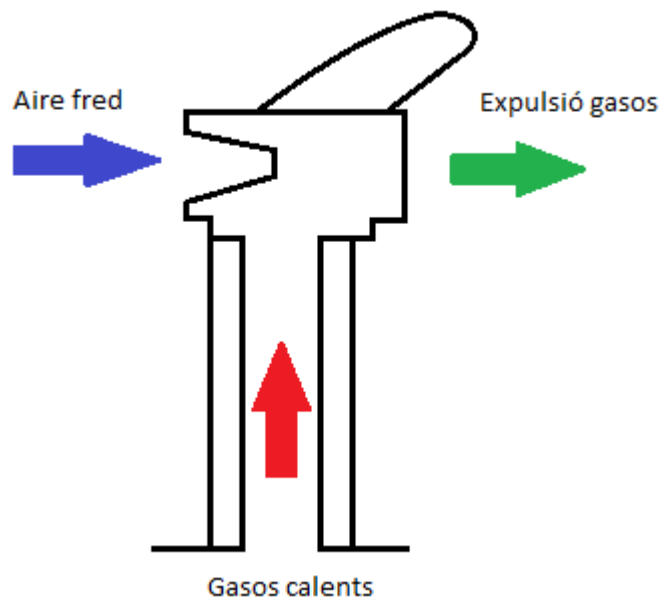


Figura 4.11 Esquema barret de ventilació d'una xemeneia

### 4.3.2. Cavitació

Anteriorment s'ha realitzat una petita explicació sobre el concepte pressió de vapor. Per tal d'entendre el concepte de cavitació és necessari aprofundir amb més detall.

La pressió de vapor és aquella a la que un líquid entra en ebullició i està en equilibri amb el seu propi vapor. Per exemple, la pressió de vapor de l'aigua a 20°C és 2337 Pa mentre que la del mercuri és 0,168 Pa. Si la pressió del líquid és més gran que la pressió de vapor, l'únic intercanvi que es produeix entre líquid-vapor és la evaporació en la interfase. A mesura que el líquid es va apropant a la pressió de vapor, començaran a produir-se algunes bombolles de vapor en el líquid. Per a entendre el concepte, si l'aigua s'escalfa a 100°C, la seva pressió de vapor augmenta fins als 101300 Pa i, per tant, a la temperatura atmosfèrica entrarà en ebullició. Quan la pressió del líquid és inferior a la pressió de vapor, apareix la cavitació. La cavitació però, té certes restriccions. Es diferencia de l'ebullició en que aquest procés és isotèrmic, és a dir, a temperatura constant. Això significa que la pressió de vapor es manté constant durant aquest procés, i el fet que produeix una davallada en la pressió és l'augment de la velocitat del fluid. A efectes pràctics, si accelerem l'aigua des de el repòs fins a uns 15 m/s, la pressió disminueix aproximadament 1 atm. Això pot provocar cavitació.

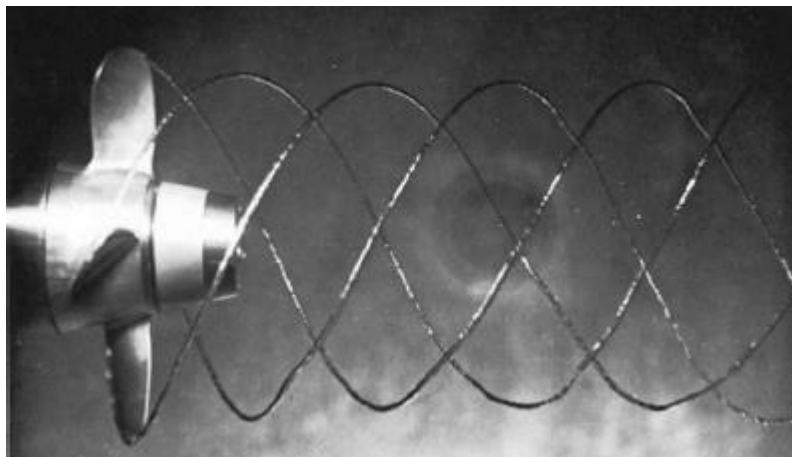
El paràmetre adimensional que descriu aquest fenomen és el nombre de cavitació:

$$Ca = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho V^2}$$

*Eq. 4.16*

On  $p$  és la pressió ambient,  $p_v$  pressió de vapor,  $V$  velocitat característica i  $\rho$  la densitat del líquid.

La geometria té una gran influència en el valor llindar de  $Ca$  ( $\sigma$  a nivell internacional) per sota del qual començarà la cavitació. Les bombolles de cavitació apareixen a les regions de pressions baixes, associades a zones on la velocitat del fluid és molt alta. Quan aquestes bombolles penetren regions de pressions més altes, col·lapsen de forma implosiva. Aquest fenomen produeix una alliberació gran de energia que pot erosionar superfícies metàl·liques fins al punt d'arribar a destruir-les.



*Figura 4.12* Cavitació generada per la rotació de l'hèlix



*Figura 4.13* Efectes erosionadors provocats per la cavitació

## 4.4. Definició del model numèric

A continuació s'expliquen els motius per a la utilització d'eines de simulació computacional i concretament del programa CFX. Es comenta el millor model per al tipus de simulació a realitzar i les equacions que el programa utilitza per a solucionar-ho.

### 4.4.1. Introducció al CFD

La Dinàmica de Fluids Computacional, abreviat a CFD per les sigles en anglès, és una branca de la mecànica de fluids que utilitza algorismes i mètodes numèrics basats en els principis de conservació de la massa, la quantitat de moviment i l'energia per a la resolució i l'anàlisi sobre el flux de fluids.

El CFD simula el pas dels fluids, ja siguin líquids o gasos, a través d'un objecte o al voltant d'aquest. Aquest anàlisi pot ser molt complex, amb càlcul de transferència de calor, mescles, fluxos inestables i compressibles.

Els resultats obtinguts per la solució de les equacions, corresponen amb el valor de les variables de camp en cada punt de la malla. S'ha de saber reduir aquest enorme nombre de resultats a aquells fonamentals i significatius per a poder obtenir resultats amb facilitat.

Algunes de les aplicacions de la dinàmica de fluids computacional són:

- Aerodinàmica
- Hidrodinàmica
- Motors
- Turbomàquines
- Transferència de calor
- Combustió
- Enginyeria de processos
- Càrregues de vent
- Riscos de foc i explosions
- Enginyeria mediambiental

- Enginyeria costera
- Hidràulica
- Oceanografia
- Meteorologia
- Enginyeria biomèdica
- Electrònica.

#### 4.4.2. Discretització del domini

Inicialment és necessari fer una discretització del volum de control, per posteriorment calcular la solució final. Hi ha múltiples mètodes de discretització, fent possible una divisió en 3 categories [9]:

- Diferències finites
- Volums finits
- Elements finits

Tots aquests mètodes necessiten d'una discretització de les equacions que defineixen el fluid. Ens centrarem en dos tipus de mallat:

- Mallat estructurat: Les cel·les de la malla són quadrilàters en 2-D, i hexaedres en el cas de 3-D.
- Mallat no estructurat: Les cel·les i els nodes de la malla no segueixen cap ordre establert. Els elements de la malla són una barreja de quadrilàters i triangles en 2-D i hexaedres en 3-D.

La decisió d'escollir un o altre model de mallat, depèn del tipus de discretització de les equacions utilitzades. El mètode de diferències finites discretitza les equacions de Navier-Stokes, a les quals profunditzarem més endavant, en forma diferencial i necessita d'una malla estructurada. En canvi el mètode de volums finits, per exemple, necessita de punts de control en cada volum generat, podent situar els nodes al centre del element (cell-centered) o als vèrtex (cell vertex).



Trobem pros i contres en ambdós tipus de mallat. Referent al mallat estructurat, s'ha de dir que el principal avantatge recau en la homogeneïtat dels elements i per tant la facilitat de tractar els elements veïns. Per contra no conta amb una gran flexibilitat per a dominis complexos i geometries irregulars. D'altra banda una malla desestructurada, conta amb molta flexibilitat per adaptar-se a qualsevol geometria i és molt més fàcil de generar per a la computadora ja que no ha de complir cap tipus d'ordre predeterminat. Per el contrari, cal dir que la malla ocupa molt més memòria que una malla estructurada.

#### 4.4.3. Equacions resoltes pel programa

Un cop entesa la discretització del domini, és més fàcil veure com treballa el *sol/ver* a l'hora de trobar una solució. Es resolen les equacions de forma diferencial sobre els dominis discretitzats anteriorment anomenats. S'obtenen solucions nodals de forma iterativa fins que aquesta convergeix. Principalment s'utilitzen dues equacions: l'equació diferencial de conservació de la massa i l'equació diferencial de la quantitat de moviment. Tenint en compte clar, un flux estacionari, compressible i newtonià.

La primera expressió en forma diferencial de l'equació de conservació de la massa resulta:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0$$

*Eq.4.17*

Al tractar-se d'un flux incompressible, la densitat roman constant. A més, tenint en compte el supòsit de flux permanent, les propietats no depenen del temps sinó de la posició. Simplificant l'expressió anterior obtenim:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

*Eq.4.18*

A partir de la segona llei de Newton, aplicada al moviment d'un flux dins d'un volum de control diferencial, obtenim els tres components de l'equació diferencial de la quantitat de moviment. Les equacions resultants s'anomenen equacions de Navier-Stokes. Tenint en compte un flux incompressible, amb densitat constant i viscositat, les equacions queden de la següent manera:

$$\rho g_x - \frac{dP}{dx} + \mu \left( \frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{d^2 u}{dz^2} \right) = \rho \frac{du}{dt}$$

$$\rho g_y - \frac{dP}{dy} + \mu \left( \frac{d^2 v}{dx^2} + \frac{d^2 v}{dy^2} + \frac{d^2 v}{dz^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt}$$

$$\rho g_z - \frac{dP}{dz} + \mu \left( \frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{d^2 w}{dy^2} + \frac{d^2 w}{dz^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt}$$

*Eqs.4.19, 4.20 i 4.21*

#### 4.4.4. Model de cavitació

Amb ANSYS CFX, la cavitació s'implementa com un model multifàsic. La majoria de simulacions poden utilitzar el model homogeni multifàsic, perquè sovint se suposa que el camp de velocitat del vapor és el mateix que el del líquid. No obstant, el model no homogeni es pot utilitzar si es desitja.

Per a problemes de cavitació, el nivell de pressió ha d'establir-se en un dels límits. Aquest fet es deu a que la taxa de cavitació està impulsada per la diferencia entre la pressió local i la pressió de vapor, per el que el nivell de pressió és molt important. Els límits d'entrada normalment utilitzen una fracció de volum de vapor de 0 ja que el vapor es genera dins del domini [10].

Al resoldre problemes de cavitació, múltiples variables a l'arxiu estan modificades a partir del seu comportament estàndard:

- Pressió: El model de cavitació, és un model el qual té en compte la transferència de massa, i no garanteix que totes les pressions absolutes calculades per el solucionador siguin positives. No obstant, seran menys negatives que si la cavitació no es modela. Amb unes mateixes condicions de contorn, les pressions obtingudes sense activar el mòdul de cavitació poden arribar a ser molt més baixes que amb el mòdul activat. Al activar la cavitació, les pressions obtingudes s'apropen més a les reals, ja que l'aparició de vapor és un fet que succeeix al món real i per tant s'ha de tindre en compte.

Per a fer que el postprocessat sigui més convenient, la variable pressió serà referenciada a 0 atm.

- Pressió absoluta: Per evitar un problema de robustesa associat amb la pressió absoluta negativa, la variable pressió absoluta es retalla per a que aquesta no sigui més petita que la pressió de saturació. Però la verdadera pressió absoluta és emprada per a calcular la cavitació. Ja que una pressió negativa provoca un efecte de succió al sistema.
- Densitat: Per a millorar l'estabilitat numèrica, el camp de densitat de vapor es retalla de forma controlada per l'usuari a través del paràmetre "Maximum density proportion". Deixant una densitat constant, encara que a l'hora de calcular la cavitació, es tindrà en compte la densitat real.

Si s'escull la cavitació com a model de transferència de massa, es pot escollir entre model Rayleigh Plesset i un model definit per l'usuari. El model Rayleigh Plesset requereix dels següents paràmetres:

- Pressió de saturació: Ha d'especificar-se com un valor o una expressió. En aquest projecte es definirà un valor fix.
- Diàmetre mig: S'ha de fixar en el lloc de nucleació. Per defecte el valor  $2 \cdot 10^{-6}$  m és un valor raonable.
- Coeficient de condensació de cavitació: Aquest és un factor empíric, per explicar el fet que la condensació generalment succeeix lentament. El valor predeterminat és 0,01.

- Coeficient de vaporització de cavitació: A diferència del anterior, és un valor empíric que determina que la vaporització succeeix ràpidament. Té un valor predeterminat de 50.
- Proporció de densitat màxima: Valor que retalla la densitat per a tots els termes menys per a la regió on trobem cavitació, on aquesta densitat és la real. El valor predeterminat és 1000.

#### 4.4.5. Model de turbulència

En les simulacions del projecte s'utilitza el model de turbulència SST, que és la abreviatura de Shear Stress Transport. El model SST combina de manera eficaç la formulació robusta i precisa del model  $k-\omega$  a la regió propera a la paret amb independència del flux lliure del model  $k-\epsilon$  lluny de la paret, amb la precisió a l'hora de modelar les propietats llunyanes a la paret del model  $k-\epsilon$ . Per aconseguir aquest efecte, el model  $k-\epsilon$  es transforma en una formulació  $k-\omega$  [11].

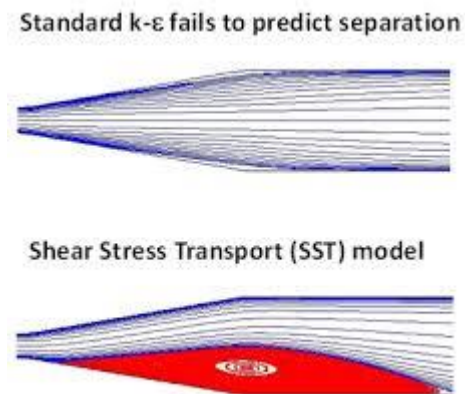


Figura 4.14 Comparativa del despreniment de capa límit entre  $k-\epsilon$  estàndard i SST

El model SST és similar al model k- $\omega$  estàndard, però inclou els següents refinaments:

- El model k- $\omega$  estàndard i el k- $\epsilon$  transformat es multipliquen degut a una funció de combinació i ambdós models es sumen. La funció de fusió està dissenyada de tal manera que, sigui una quan la regió és propera a la paret, que activa el model k- $\omega$ , i una altra quan es troba a la superfície, activant el k- $\epsilon$  transformat.
- La definició de la viscositat turbulenta es modifica per tenir en compte el transport de la tensió de cisallament turbulenta.
- Les constants de modelat són diferents.

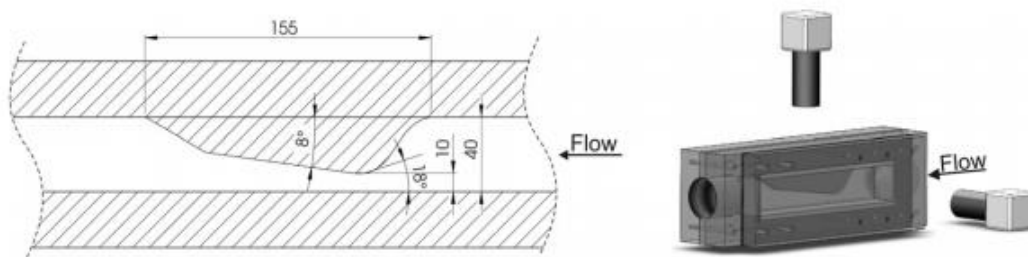
Aquestes característiques fan que el model SST sigui més precís i fiable per a una quantitat més ampla de fluxos, com per exemple ,fluxos de gradients de pressions adversos, perfils aerodinàmics, etc...

A més, aquest model compta amb certes modificacions que inclouen la addició d'un terme de difusió creuada a la equació  $\omega$  i una funció de fusió per a garantir que les equacions del model es comportin de manera adequada a zones properes de la paret i a camp llunyà.

## 5. Model numèric CFD

### 5.1. Creació de la geometria

Per a la realització de qualsevol tipus de simulació és necessari comptar amb el disseny del domini d'estudi. En aquest cas en particular, consisteix en modelar una secció longitudinal del dispositiu d'estudi, basat en el tub Venturi. Per a dissenyar la geometria es poden utilitzar múltiples programes CAD, com el SolidWorks, Catia, AutoCad o amb el mateix ANSYS. S'ha optat per al disseny en SolidWorks degut a la facilitat per accedir a aquest software i la simplicitat del domini.



*Figura 5.1* Esquema tub Venturi del projecte

Per a la simulació en CFX, tot i que la idea és realitzar un anàlisi en 2-D, és necessari crear un volum de control, no una superfície. Per tal que a efectes pràctics sigui un anàlisi en 2-D, es dota al domini d'una profunditat d'1 mm. Un altre aspecte important a valorar en el moment de crear la geometria, és la llargada d'aquest. S'ha de tenir en compte que, definint un domini estrictament igual de llarg a la realitat, lo més probable és que resultin problemes de convergència en la solució. L'aparició d'un flux desordenat i, que no compleixi un comportament estacionari, és un handicap molt gran per donar validesa als resultats.

D'aquesta manera inicialment, partint de que la longitud  $L = 155$  mm del Venturi:



*Figura 5.2* Plànol de cotes del disseny del domini inicial

Es fixa una longitud de  $2L$  posterior al Venturi per assegurar que el fluid al final del domini ja tingui un comportament totalment permanent i desenvolupat. D'aquesta manera la solució de les velocitats a la sortida convergeixen al mateix valor que a l'entrada, per a la conservació de la massa, ja que les àrees són les mateixes.

L'entrada del domini és molt menys conflictiva, ja que el fluid no traspasa cap geometria complicada. Es fixa la longitud prèvia al Venturi de  $1/5$  de  $L$ .

Un cop creada la geometria i a partir de les característiques geomètriques del disseny, es determina el tipus de flux d'estudi.

Es realitza el càlcul a les zones de velocitat de l'aigua més alta i més baixa. A partir dels valors obtinguts es defineix un valor del nombre de Reynolds:

- $D_h$ : Al "inlet" pren un valor de  $0,016$  m i a la gola del Venturi de  $0,01$  m .
- $Re$ : Comprés entre  $52000 < Re < 159000$ , per tant clarament un flux turbulent.

## 5.2. Creació de la Malla

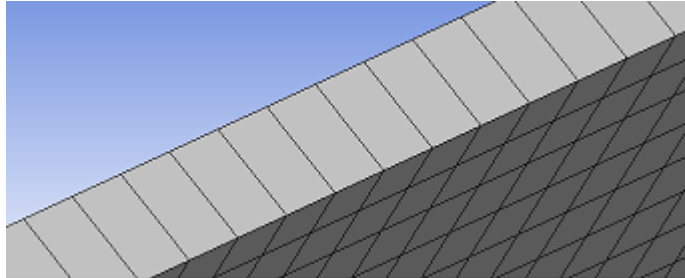
Dissenyada ja la geometria, es defineix la malla que discretitza el domini estudiat. És un pas essencial en el projecte, una malla defectuosa provocaria qüestionar la validesa dels resultats i portaria a solucions, o bé no convergides, o que difereixen molt de la realitat.

Per a la definició de la malla, s'ha de tenir en compte que és important arribar a un alt nivell de precisió amb els mínims elements possibles per a optimitzar els recursos del software. No té sentit sobrecarregar una malla amb elements petits en una zona de poc interès a nivell fluido-dinàmic. Com més grans siguin els elements que conformen la malla, menys acurada serà la solució obtinguda. Una malla més refinada proporcionarà uns resultats més fiables, però amb un temps de processament per a la solució molt gran, i un consum de recursos enorme.

Per tant, l'objectiu per a la creació de la malla és el d'obtenir el mallat òptim amb el menor nombre d'elements però que retorni uns resultats fiables. Per tal d'aconseguir aquest objectiu es duen a terme múltiples tècniques de mallat. Refinant els contorns de la paret on apareix la capa límit i definint elements més petits a la longitud  $L$  del Venturi original. D'aquesta manera tot el que succeeix a les parets del dispositiu, així com el desprendiment de la capa límit, queden ben definits per el mallat emprat.

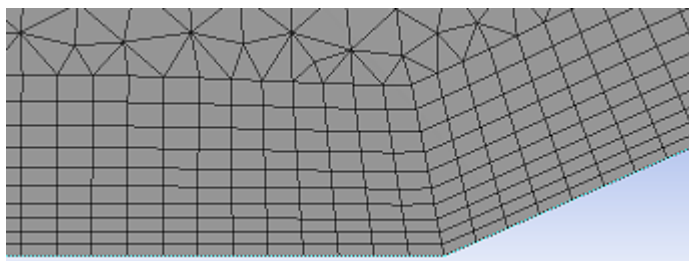
A continuació es fa un desglossament de les tècniques de mallat utilitzat [12]:

- Sweep method: Imposar que el gruix d'elements sigui per assegurar una simulació 2-D



*Figura 5.3 Tècnica de mallat "Sweep Method" per a imposar 1 element de profunditat*

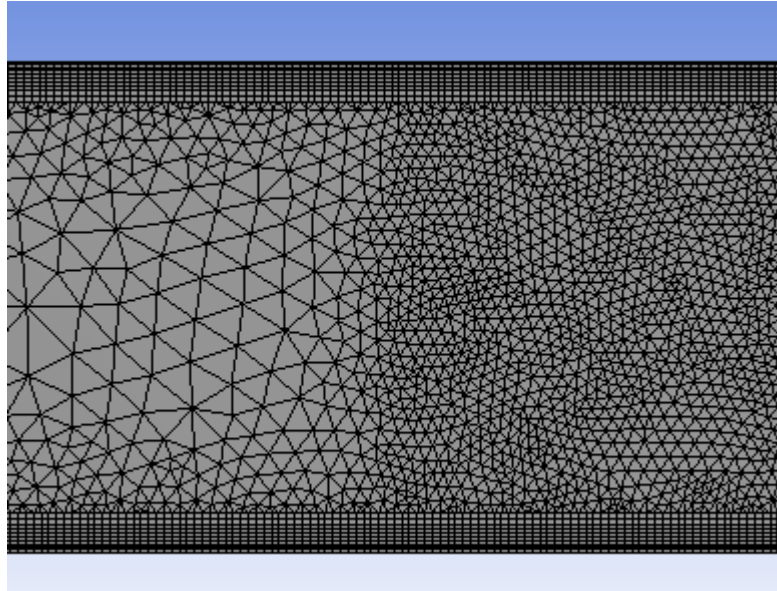
- Body Sizing: Es realitza un mallat a tot el volum de domini, imposant una mida d'element no massa petita per posteriorment refinar les zones d'interès. Com el volum de control té una geometria irregular es selecciona la opció "curvature", per adaptar-se millor als canvis de direcció del contorn.
- Edge Sizing: Es defineix una longitud de l'element per a tot el perímetre mullat del domini. Aquesta zona és d'interès, ja que apareixen forces de fricció entre sòlid i fluid i la generació de la capa límit.
- Inflation: Es fa un refinament per tot el perímetre del domini. S'utilitzen elements quadrats i uniformes de mida més petita. A mesura que la distància a la paret augmenta, els elements es fan cada vegada més amples. Aquest es un mètode de mallat per capes.



*Figura 5.4 Tècnica de mallat Inflation per al refinament del perímetre a partir d'una mida d'element imposada amb Edge Sizing*

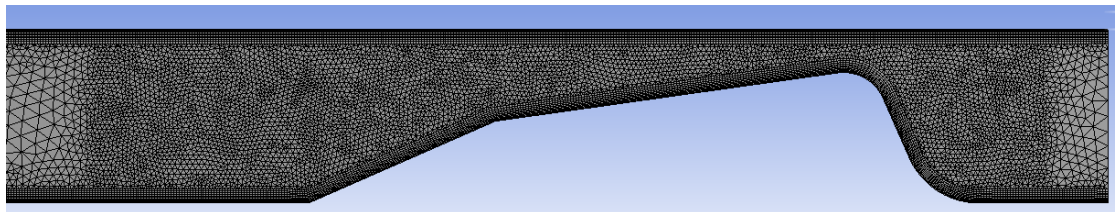


- **Body of influence:** Realitza un mallat molt més precís en un volum específic que prèviament es confecciona i sobreposa a la geometria de referència. Aquest volum específic és el propi Venturi de longitud  $L$ .



*Figura 5.5* Diferència de refinament a partir d'un "Body of Influence" per al refinament d'una àrea en concret

Després de l'aplicació de tots els mètodes avançats de mallat prèviament comentats, el domini queda discretitzat de la manera següent:



*Figura 5.6* Malla definitiva del domini d'estudi

Definida ja la malla, es realitza un anàlisi de sensibilitat d'aquesta respecte al nombre d'elements del domini computacional. Per a fer aquest estudi es defineixen unes variables de control, a partir de les quals, es considera que la solució convergeix per a un determinat nombre d'elements.

Aquestes propietats són:

- Pressió a l'inlet
- Pressió a l'outlet
- Velocitat màxima del fluid a la gola del Venturi

Cal indicar que tots aquests anàlisis es realitzaran sense el mòdul de cavitació activat. Només quan s'hagi simulat correctament el cas sense cavitació s'iniciarà l'estudi d'aquest fenomen.

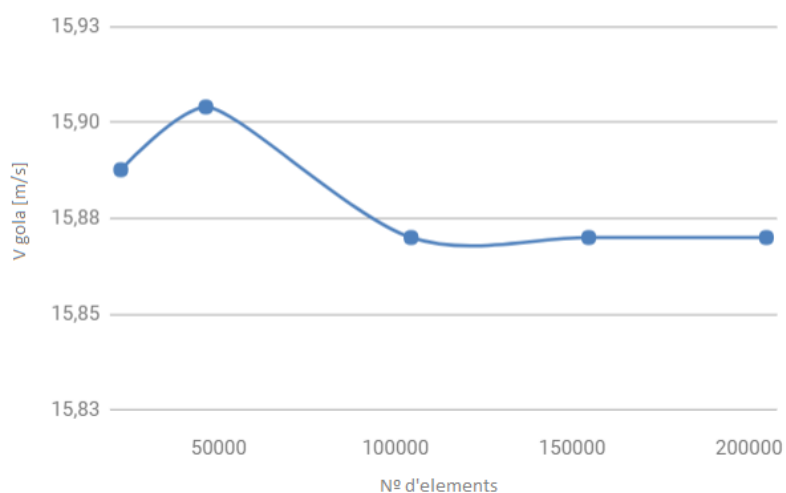


Figura 5.7 Gràfic de sensibilitat d'elements envers Velocitat a la gola del Venturi

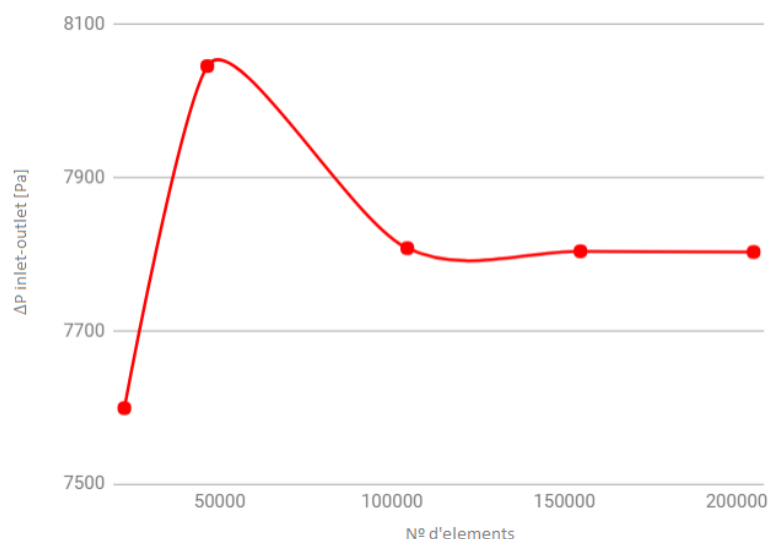


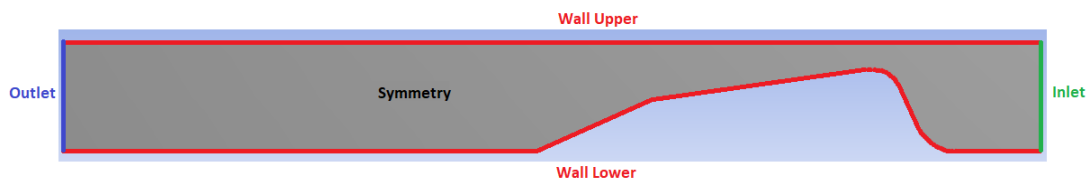
Figura 5.8 Gràfic de sensibilitat d'elements envers la variació de pressions entre "Inlet" i "Outlet"

A partir dels gràfics anteriors es comprova com entorn als 100.000 elements la malla no presenta cap variació en el resultat obtingut. Tenint en compte aquest anàlisi de sensibilitat es defineix la malla òptima de 104.421 elements.

Un cop definida la malla òptima, es passa a anomenar les diferents superfícies del domini a partir de la funció "Named Selections". Aquesta eina resulta molt útil posteriorment, quan es defineixen les condicions de contorn al "Setup" i a la lectura de resultats. S'assigna el següent nom a cada superfície:

- Entrada: "Inlet"
- Sortida: "Outlet"
- Parets laterals: "Symmetry 1" i "Symmetry 2"
- Parets superior i inferior: "Wall upper" i "Wall Lower"

Encara que la funció de les parets laterals, i la de les parets inferior i superior siguin iguals entre elles, és necessari anomenar-les de manera diferent per evitar entrar en conflicte amb el llenguatge de l'ANSYS.



*Figura 5.9 Esquema de les "Named Selections"*

### 5.3. Models de simulació

A continuació es defineix el model de simulació emprat en l'estudi. Es fa una petita diferenciació bàsica en aquest punt. Tal i com es comenta durant el projecte en repetides ocasions, les simulacions es divideixen en dos parts:

- Simulació fluido-dinàmica sense mòdul de cavitació activat.
- Simulació fluido-dinàmica amb mòdul de cavitació activat.

És important separar els dos casos, ja que els models de simulació canvien d'un a l'altre, així com algunes de les referències utilitzades, com poden són la pressió de referència del sistema o el nombre de fluids presents.

#### 5.3.1. Transferència de calor

El model de transferència de calor empleat en ambdós casos al CFX menysprea els efectes tèrmics, es tracta d'un model isoterm, per tant a temperatura constant.

#### 5.3.2. Turbulència prop de les parets

Els punts més importants per a l'estudi, són prop de les parets dins de la capa límit. És per això que es té especial cura en comprovar que es realitza una bona simulació a les capes més properes a la coberta i que la malla en aquests punts és acurada.

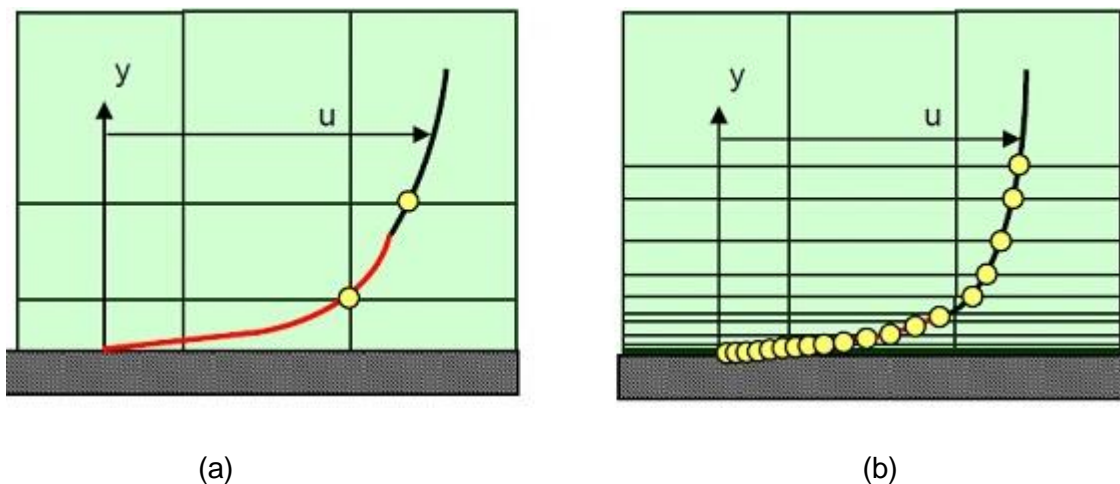


Figura 5.10 Perfil de velocitats a la capa límit sense wall function (a) i amb wall function (b)

Amb aquesta opció no cal realitzar un refinament excessivament acurat de la capa límit. El model SST utilitza aquesta funció incorporada.

El valor adimensional  $y^+$  s'utilitza per determinar el refinament que ha de tenir la malla prop del mur, per a que el tractament a prop de la paret compleixi les condicions necessàries de bon funcionament [13].

$$y^+ = y \cdot \frac{u_\tau}{\nu}$$

Eq. 5.1

Per a valorar el nivell de refinament de la malla, es gràfica el valor de la  $y^+$ , que ens indica la distancia a la paret del primer vèrtex de l'element adjacent a la mateixa. Per a que el mallat prop de les parets sigui adient el valor de la  $y^+$  ha d'estar comprès entre 20 i 200.

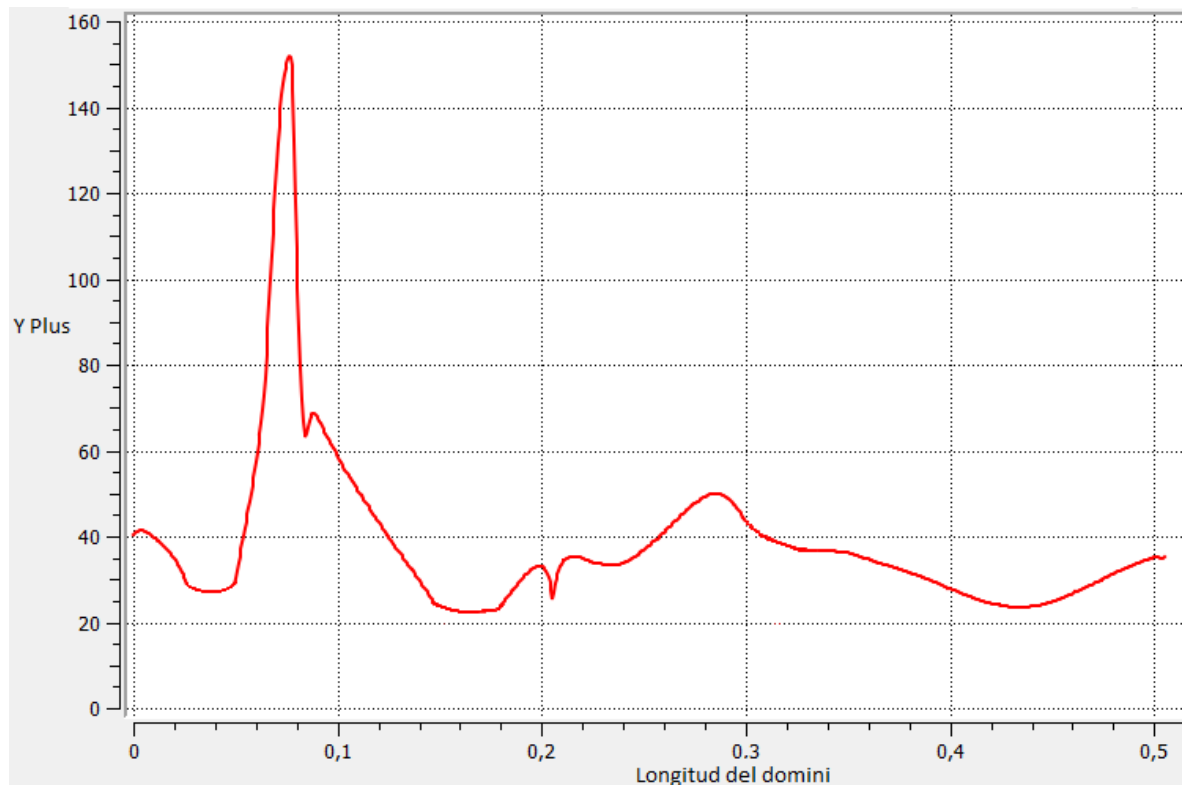


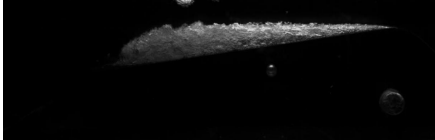
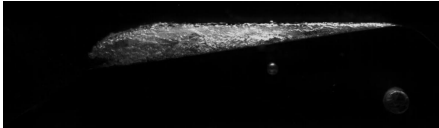


Figura 5.11 Comportament de la  $y^+$  al llarg del domini

### 5.3.3. Casos d'estudi i paràmetres de simulació

A continuació es resumeixen totes les simulacions realitzades amb els valors que aplicats a les diferents variables. També s'afegeixen les fotografies obtingudes empíricament.

	<b>Q (l/min)</b>	<b>P<sub>outlet</sub>(kPa)</b>	<b>Cavitació al laboratori</b>
Sense cavitació	78	130	No s'ha realitzat al laboratori al no haver-hi cavitació
Cavitació curta	80	110	
Cavitació intermèdia	79	90	
Cavitació llarga	78	60	
Cavitació màxima	78	55	

*Taula 5.1* Resum casos a simular

### 5.3.4. Simulació del cas sense cavitació.

Per a l'anàlisi pràctic del projecte, és bàsic partir d'una base sòlida. Per això cal iniciar a partir de la simulació sense cavitació.

Degut a que no interessa la cavitació en aquest apartat, es defineix només un fluid, que és aigua a 25°C, una pressió de referència de 1 atm (atmosfèrica). El model de turbulència és el SST i la transferència de calor nul·la (isoterm).

#### 5.3.4.1. Condicions de contorn i càlcul de solució

Un cop en aquest punt s'apliquen les condicions de contorn del cas a estudiar. Per tal d'aconseguir una solució robusta, es defineix una pressió d'entrada i una velocitat de sortida. El sistema queda definit amb les següents variables:

- $P_{\text{entrada}} = P_{\text{est}} + P_{\text{din}} = 244281,25 \text{ Pa}$
- $Q_{\text{entrada}} = 78 \text{ l/min}$ ; per continuïtat  $V_{\text{entrada}} = V_{\text{sortida}}$ ;
- $V_{\text{sortida}} = Q/A = 3,25 \text{ m/s}$

A partir de les "*Named selections*", al "*Setup*" s'assigna el comportament i les propietats de cada regió amb el que li correspon. Finalment, s'afegeix manualment monitors de control a partir dels quals s'observen els seus residus al final de la simulació:

- $P_{\text{inlet}}: \text{areaAve(Pressure)}@inlet$
- $P_{\text{outlet}}: \text{areaAve(Pressure)}@outlet$

En aquest punt es córrer la solució i s'observa la convergència dels residus. S'ha fixat un valor màxim de 200 iteracions per a les simulacions. El càlcul de solucions s'atura o bé quan els residus hagin convergit a un valor de  $10^{-4}$ , o quan les iteracions imposades s'hagin completat. Si és necessari es pot modificar el timescale per tal de fer una simulació més lenta i trobar una estabilització dels residus.

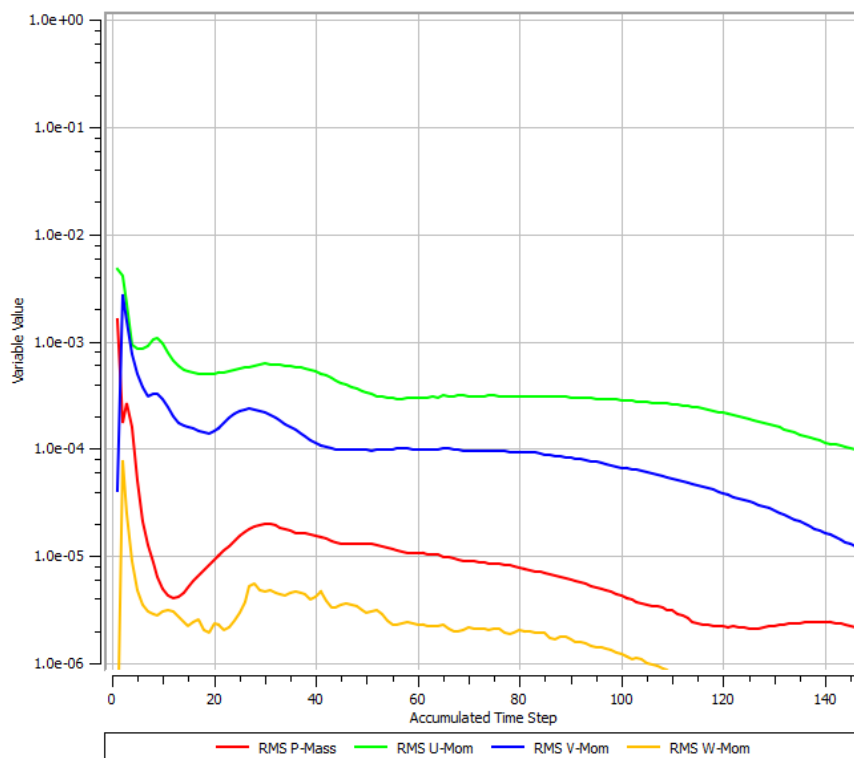


Figura 5.12 Gràfic dels residus del cas base sense cavitació

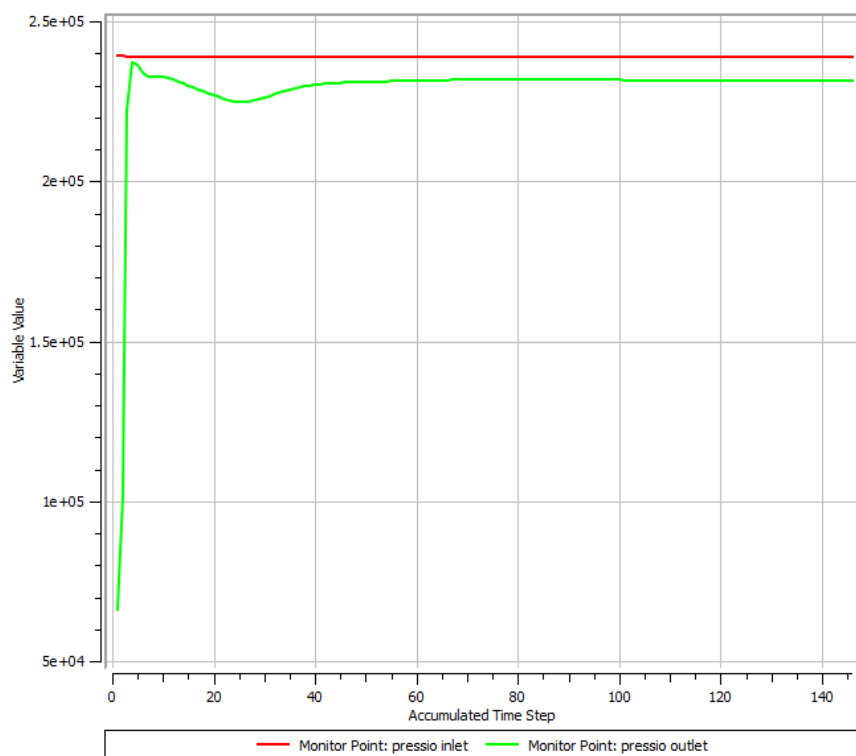
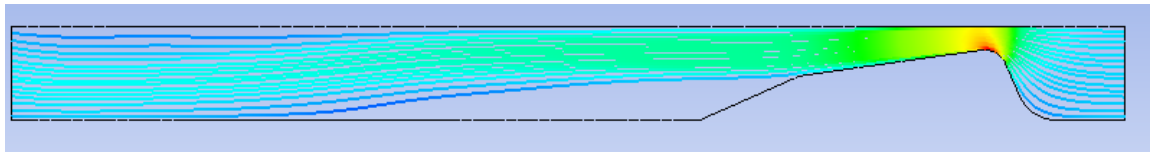


Figura 5.13 Gràfic de les pressions del cas base sense cavitació



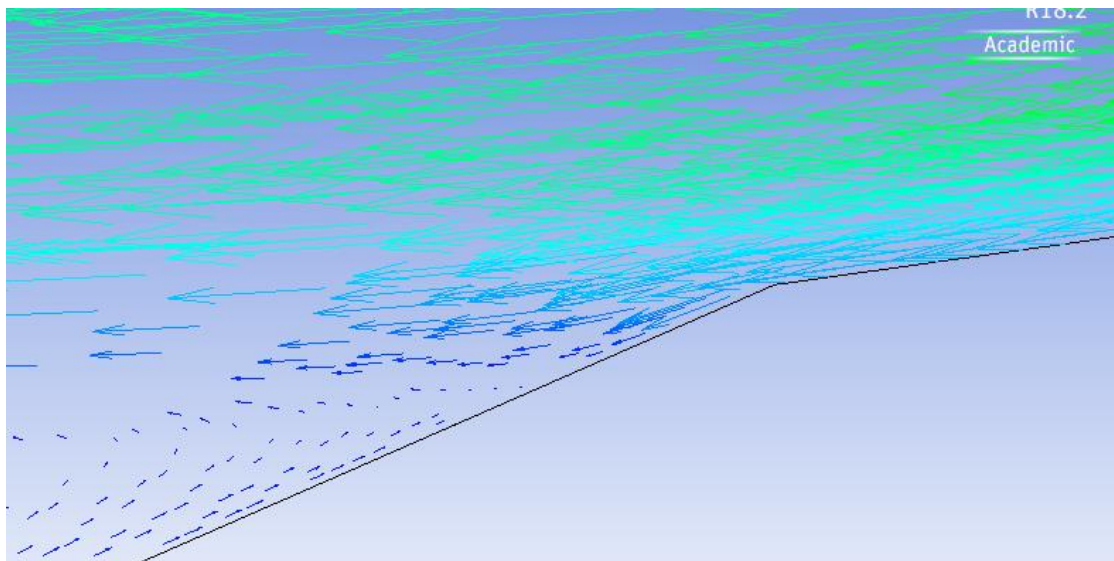
Amb els gràfics de residus s'aprecia com hi ha una convergència absoluta en el resultat. Els valors d'aquests es situen per sota de  $10^{-4}$ , valor suficient i necessari per a dotar de validesa la solució. A més, la monitorització de les pressions a la entrada i a la sortida permet veure com aquestes s'estabilitzen durant la simulació.

És moment doncs, d'utilitzar el CFX-Post per la visualització del comportament del fluid a través del domini de control.



*Figura 5.14* Línies de corrent del cas base sense cavitació

Observant les línies de corrent es veu un desprendiment de la capa límit després de passar per l'acceleració del tub venturi. Aquest desprendiment és causat per un gradient de pressions advers el qual provoca una recirculació del flux en direcció contrària que entra per sota del fluid i fa que aquest es desenganxi.



*Figura 5.15* Vòrtex generat pel desprendiment de la capa límit

Queda ben clar com una petita part del fluid víctima d'aquest gradient advers de pressió, forma un vòrtex el qual provoca la separació de la capa límit.

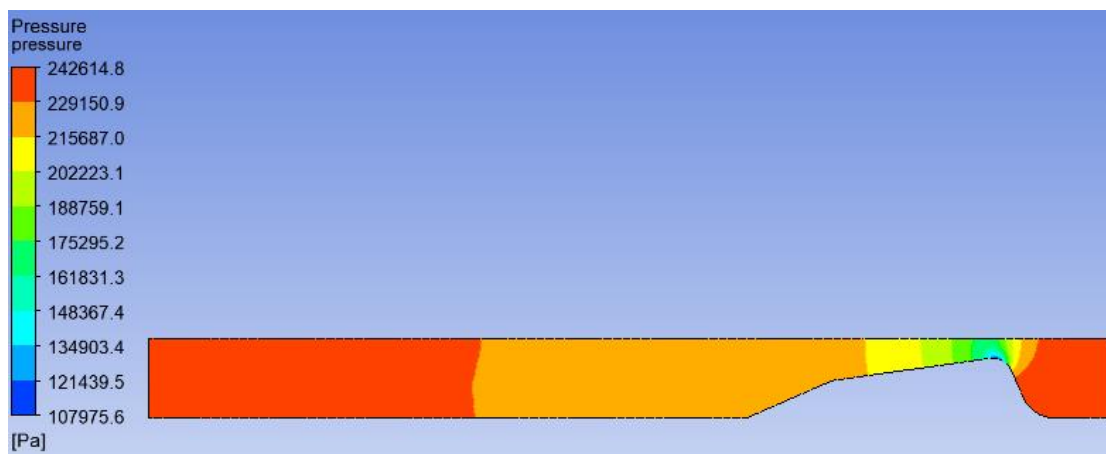


Figura 5.16 Pressions al cas base sense cavitació

Pel que fa a les pressions, existeix una davallada d'aquesta quan el fluid entra a la gola. Pel principi de Bernoulli es troba que l'explicació és clara, l'àrea queda disminuïda provocant un augment en la velocitat del fluid que conseqüentment provoca una caiguda de la pressió en aquell punt. A mesura que el fluid s'allunya del Venturi la pressió torna a restablir-se així com la velocitat.

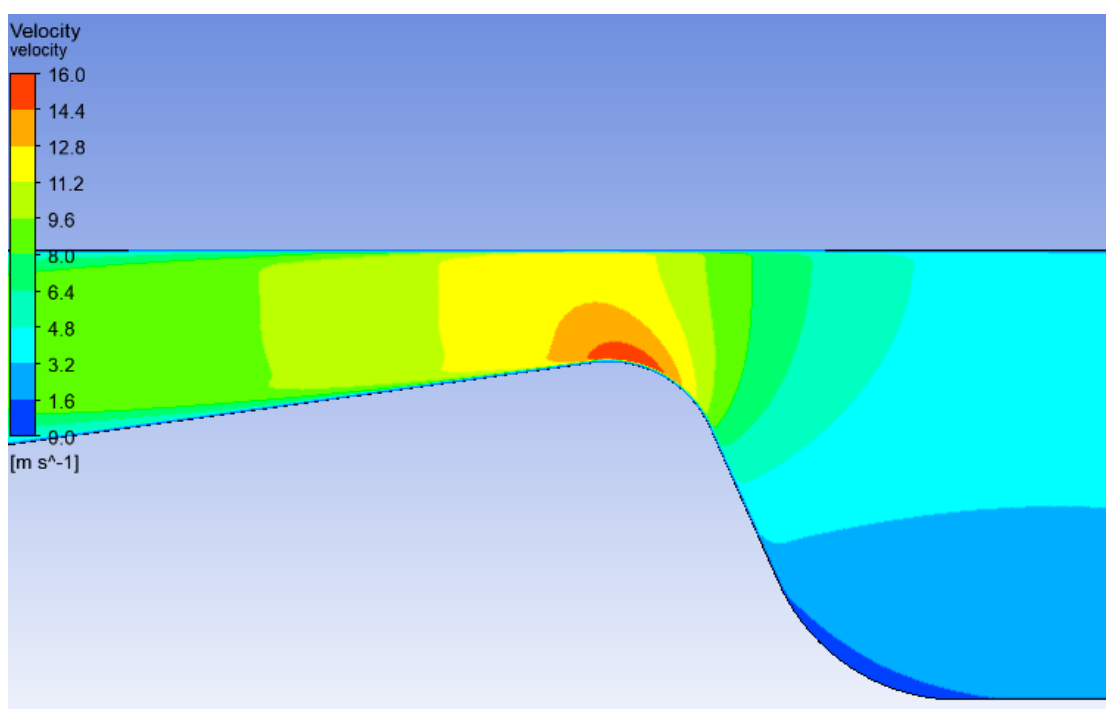


Figura 5.17 Velocitat màxima generada a la gola del Venturi

### 5.3.5. Simulació casos amb cavitació

Cal comentar, que un cop realitzada la simulació amb el domini que és perfectament vàlid per al cas de no cavitació, resulta que les velocitats de entrada i sortida no es conserven i per tant l'aparició d'un problema de continuïtat. Per solucionar el problema s'allarga el domini de la part posterior a 4L a diferència del 2L anterior per assegurar que el fluid pugui desenvolupar-se completament i complir el principi de continuïtat.



*Figura 5.18 Plànol de cotes del disseny del domini modificat*

La següent etapa en el procés de simulació consisteix en reproduir 5 casos de cavitació que han estat realitzats de forma empírica al laboratori.

Com ja s'ha comentat al punt 5.3, en aquests casos on apareixerà la cavitació es modifiquen els valors de la pressió de referència a 0 atm. Com la pressió de saturació de l'aigua a 25°C és menor que 1 atm es vol evitar que apareguin pressions negatives, per això es modifica la pressió a la qual estarà referenciada la solució. El model de turbulència i la transferència de calor romandran igual, seran Shear Stress Transport i isotherm respectivament.

El gran canvi respecte la no cavitació resideix justament en els paràmetres afegits per tal de que aquesta es generi. Primer de tot, cal definir un segon fluid, el qual serà vapor d'aigua a 25°C. Per tant es tenen dos fluids, els quals coexisteixen durant la simulació. Per últim, es defineix l'existència d'una transferència de massa, a través de "Fluid Pair Models" s'activa l'opció "Cavitation". Imposant la pressió de saturació, a la corresponent a aigua a 25°C queda definit el model de cavitació.

#### 5.3.5.1. Condicions de contorn i càlcul de solució

Per a dotar al software d'una solució inicial propera a la que es pot obtenir amb cavitació, es simula cada cas sense el mòdul de cavitació activat i posteriorment s'utilitza aquest mateix resultat per començar a iterar de nou amb la opció de cavitació activa. D'aquesta manera s'evita que el programa pugui entrar en una zona molt llunyana a la solució "real", i degut a que el sistema amb cavitació és molt més complex, pugui arribar a entrar en bucle i no ser capaç de fer convergir el resultat.

A la entrada del domini, al “*inlet*”, es defineixen dues condicions de contorn essencials per a la simulació. En aquest punt tot el fluid que entra és líquid i, per tant, s'imposa en el “*inlet*” una fracció de volum de líquid igual a 1 (100%) i una fracció de volum de vapor de 0 (0%).

Degut a la dificultat d'assegurar que el fluid a la sortida és perfectament perpendicular a la superfície del “*outlet*”, en aquest cas s'imposa una  $V_{\text{entrada}}$  que sí que és perfectament perpendicular al “*inlet*”, i una pressió a la sortida. A continuació es detallen els 5 casos d'anàlisi.

#### 5.3.5.1.1 Pressió màxima sense cavitació.

A partir de la pressió de sortida, que es pot variar, es troba el punt límit per al qual a una pressió menor començarà a produir-se cavitació en el fluid. Es defineix la pressió llindar per a l'inici de cavitació.

Els valors dels residus d'aquesta simulació són:

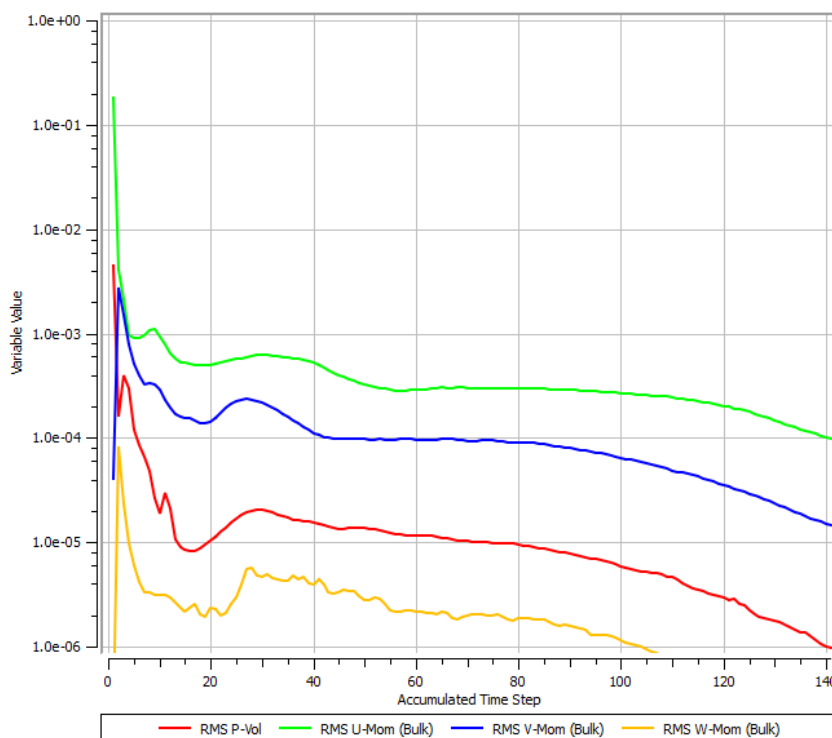


Figura 5.19 Gràfic dels residus per a una Pressió llindar

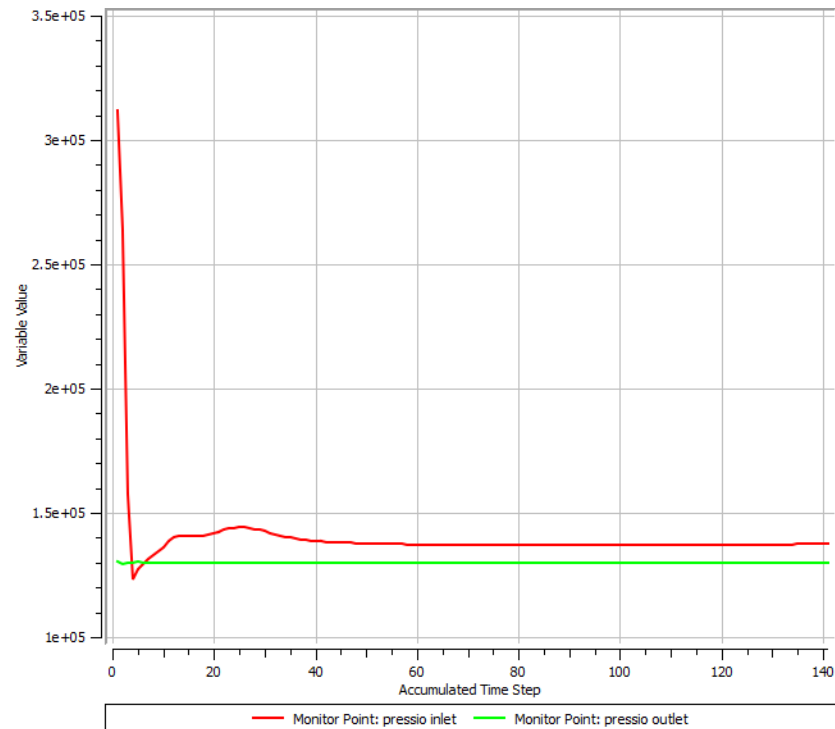


Figura 5.20 Gràfic de pressions per a una Pressió llindar

A partir del gràfic dels residus i dels monitors de control de pressions del “inlet” i “outlet” es determina que la solució convergeix perfectament. Els residus prenen valors més petits de  $10^{-4}$  i les pressions romanen constants.

Es valoren els resultats de les propietats físiques d'interès al CFX-Post:

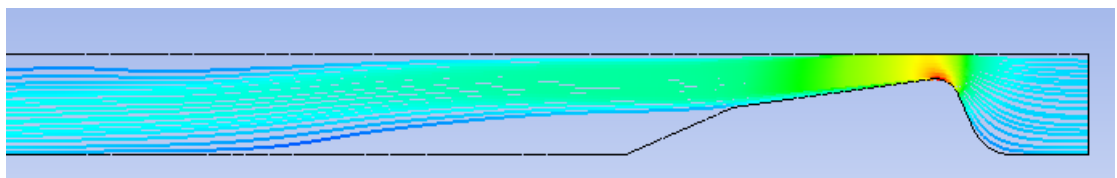
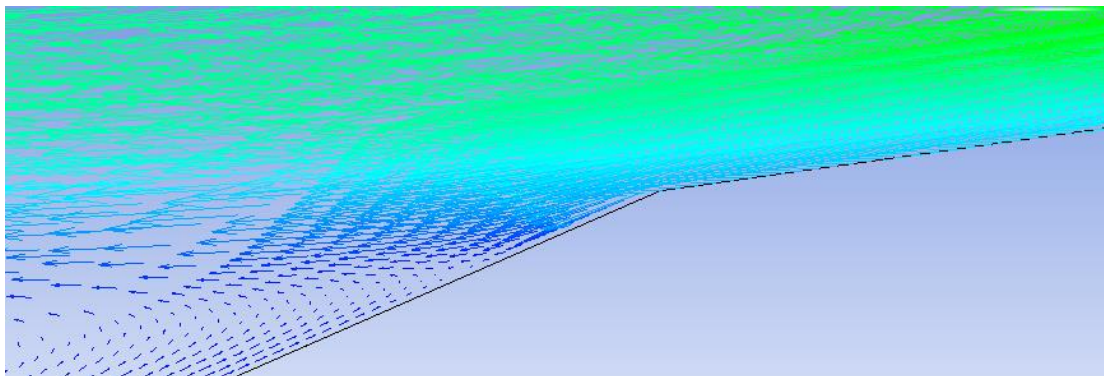
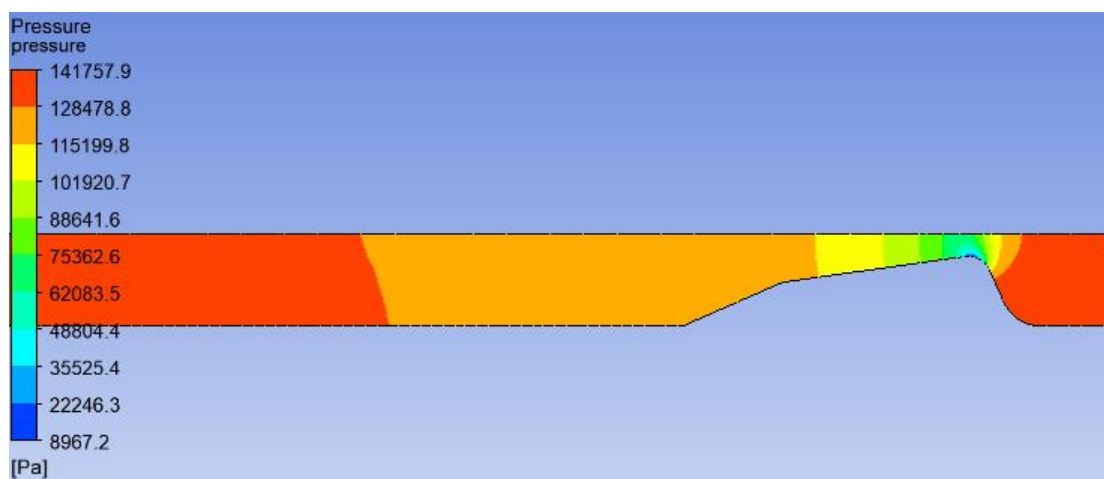


Figura 5.21 Línies de corrent per a una Pressió llindar



*Figura 5.22 Vòrtex generat pel desprendiment de la capa límit*



*Figura 5.23 Distribució de pressions per al cas de Pressió llinar*

La davallada de la pressió que es produeix a la gola és considerable, situant-se en una pressió mínima de 8967,2 Pa. Tot i així, el valor mínim que s'assoleix en aquest punt segueix sent superior a la pressió de saturació de l'aigua a 25°C.

Per tant no es produeix encara cavitació tal i com s'observa en la següent imatge:

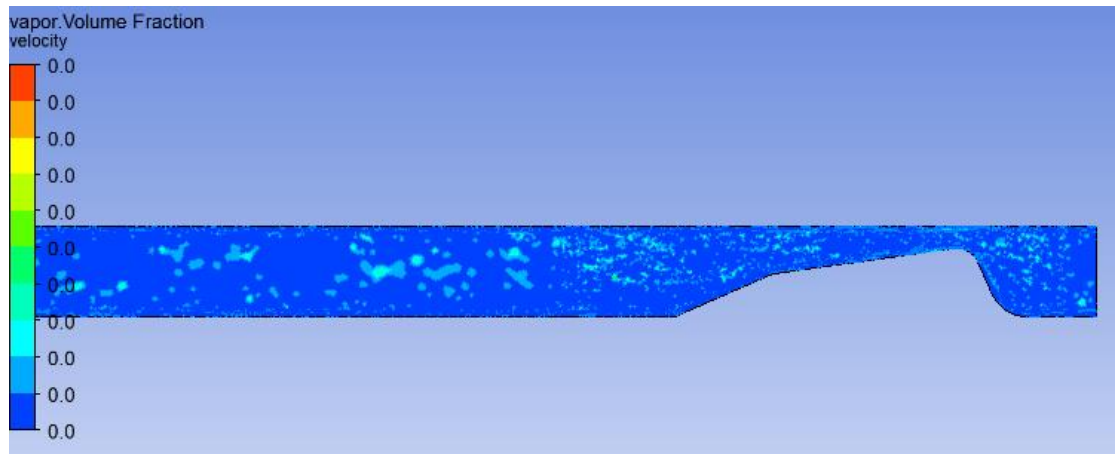


Figura 5.24 Gràfic de fracció de Vapor per a Pressió llinar

Per a analitzar l'aparició de cavitació s'utilitza un paràmetre anomenat "*Vapor Volume Fraction*", el qual proporciona la quantitat de vapor respecte al líquid present en cada zona. Com s'observa en aquest cas, ja que no existeix cavitació, la fracció de vapor és constant i igual a zero.

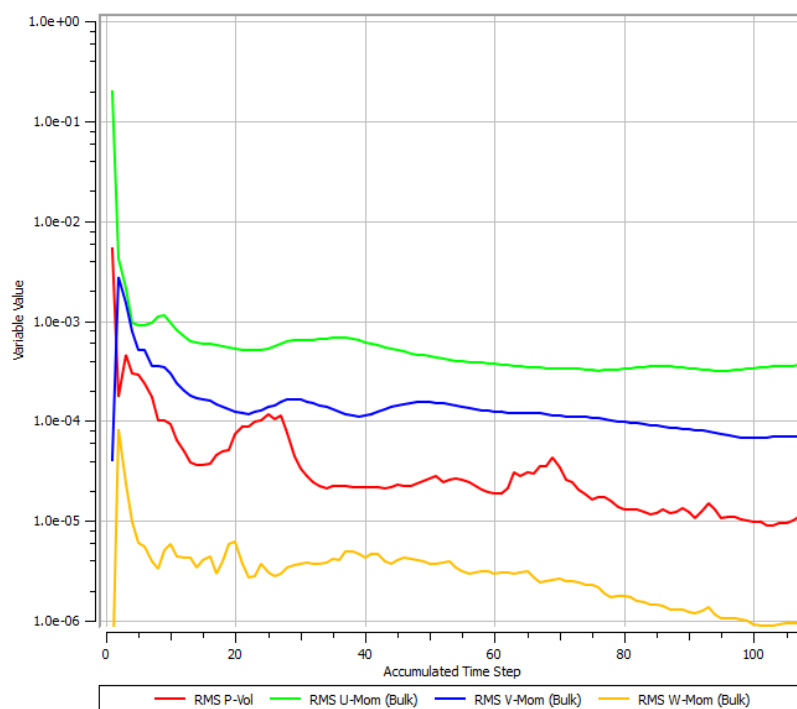
Les pressions llinar obtingudes per aquest cas són:

- $P_{\text{inlet}} = 137,6 \text{ kPa}$
- $P_{\text{outlet}} = 130 \text{ kPa}$
- $P_{\text{mínima}} = 8967,2 \text{ Pa}$

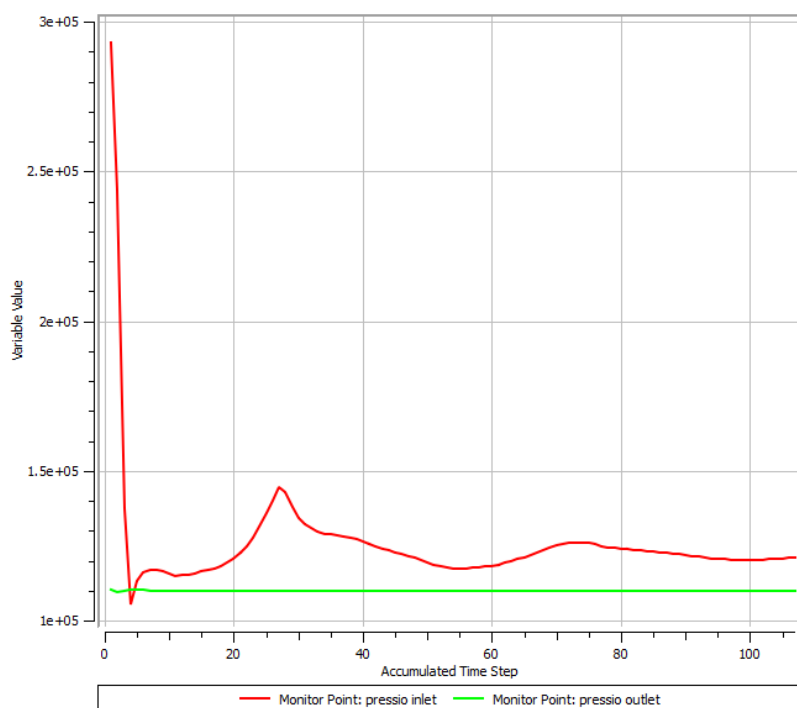
#### 5.3.5.1.2 Pressió alta amb cavitació curta.

Es simula el primer cas on apareix cavitació. Els resultats obtinguts computacionalment es comparen a partir d'ara amb mostres fotogràfiques preses a un laboratori.

Els gràfics dels residus són els següents:



*Figura 5.25* Gràfic dels residus per a una cavitació curta

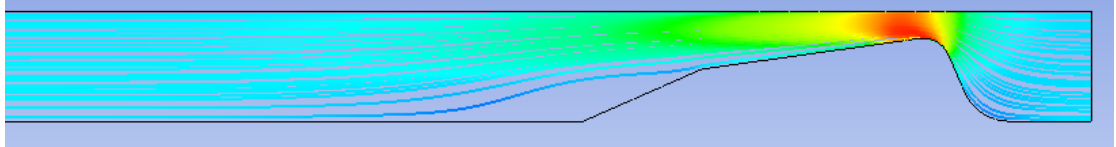


*Figura 5.26* Gràfic de pressions per a una cavitació curta

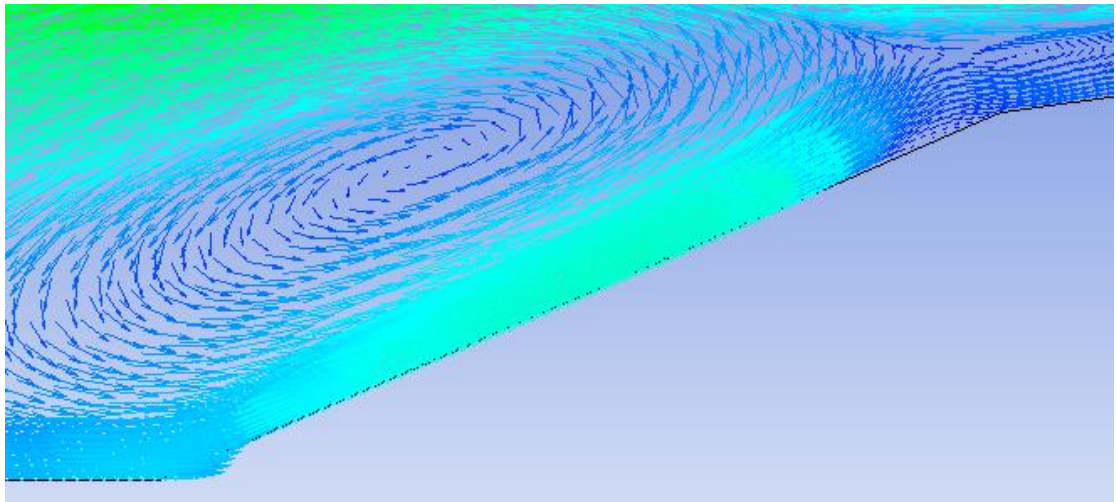


Un cop apareix la cavitació, els resultats tenen molta més dificultat per convergir. És un resultat totalment comprensible, degut a que aquest tipus de flux és clarament transitori. Tenint en compte aquest fet, els residus es comprenen entre  $10^{-3}$  i  $10^{-6}$ , uns valors molt petits i extremadament propers a  $10^{-4}$ .

Es passa a valorar els resultats de les propietats físiques d'interès al CFX-Post:

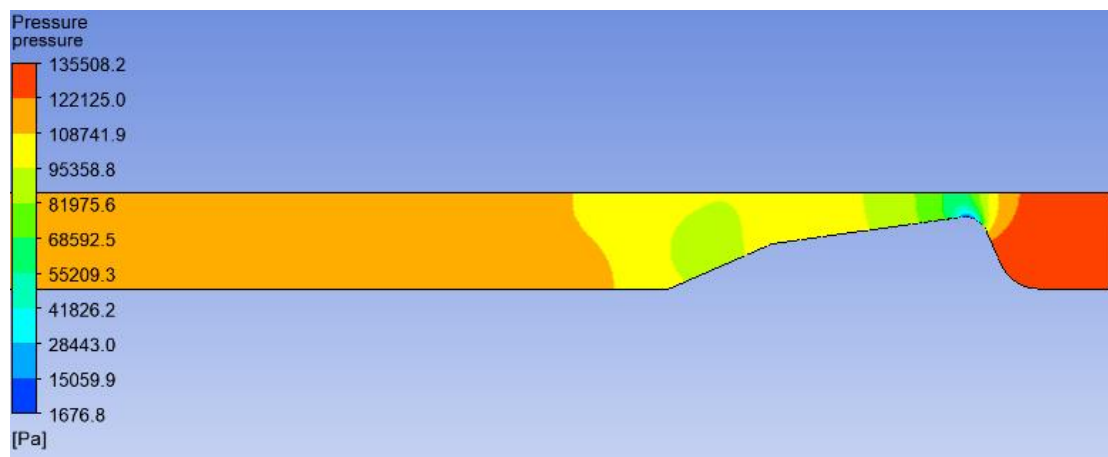


*Figura 5.27* Línies de corrent per a una cavitació curta



*Figura 5.28* Vòrtex generat pel desprendiment de la capa límit per a una cavitació curta

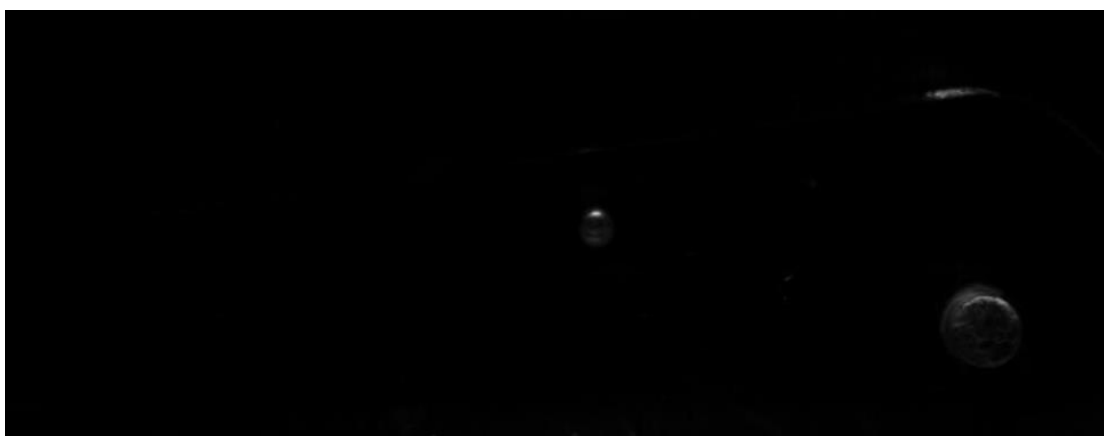
La caiguda de pressió a la gola del venturi provoca un augment de la velocitat del fluid enorme. El desprendiment de la capa límit provoca un gran vòrtex, una recirculació de fluid que desenganxa la línia de corrent, provocant un gradient de pressions advers. El vòrtex generat és de magnituds superior que al cas anterior.



*Figura 5.29* Distribució de pressions per a una cavitació curta

La pressió mínima se situa a la gola del Venturi, en aquest cas ja sí que la pressió obtinguda és de 1676,8 Pa, menor que la pressió de saturació de l'aigua i per tant es produeix cavitació. Les pressions que es generen són menors degut a la imposició de caiguda de pressió que es realitza al "Outlet."

A continuació es compara la cavitació generada computacionalment amb l'experimental:



*Figura 5.30* Cavitació curta generada al laboratori

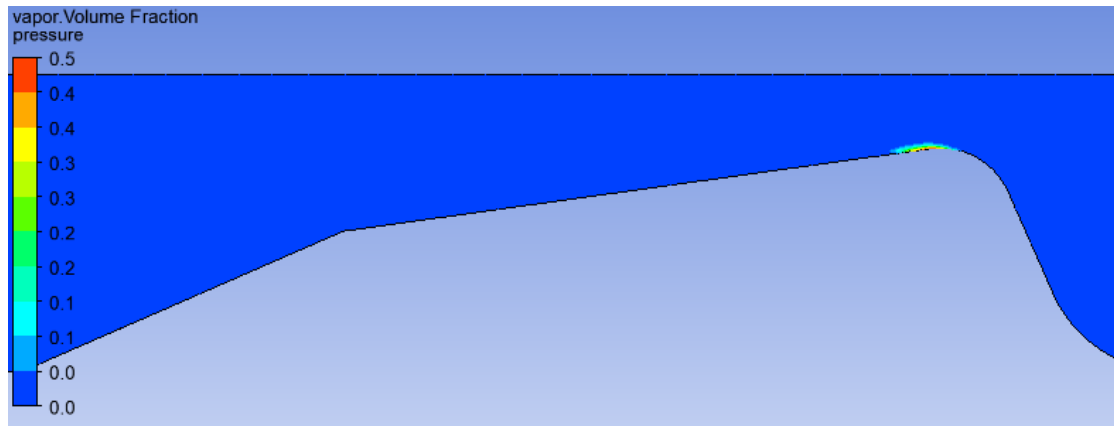


Figura 5.31 Cavitació curta generada pel CFX

Analitzant les dues imatges, s'aprecia una petita generació de cavitació a la paret inferior de la gola del Venturi. Es produeix en el punt de menor pressió, ja que aquesta és inferior a  $P_{\text{sat}}$ . En aquest cas les pressions obtingudes són:

- $P_{\text{inlet}} = 131,3 \text{ kPa}$
- $P_{\text{outlet}} = 110 \text{ kPa}$
- $P_{\text{mínima}} = 1676,8 \text{ Pa}$

#### 5.3.5.1.3 Pressió mitja amb cavitació intermèdia.

La disminució de la pressió al "Outlet" provoca que la pressió generada a la gola del Venturi cada cop sigui menor. Un cop simulat el primer cas de cavitació mínima es comença a disminuir progressivament la pressió per anar trobant una quantitat de cavitació més gran.

El valor dels residus són els següents:

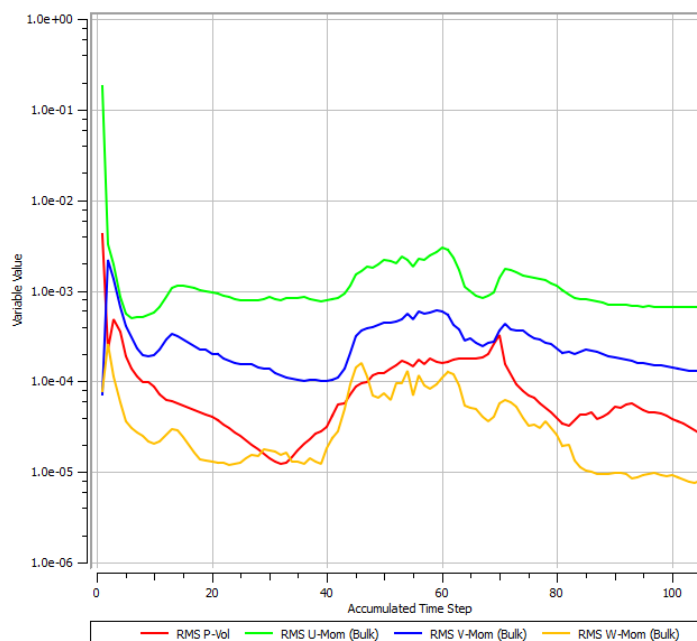


Figura 5.32 Gràfic dels residus per a una cavitació intermèdia

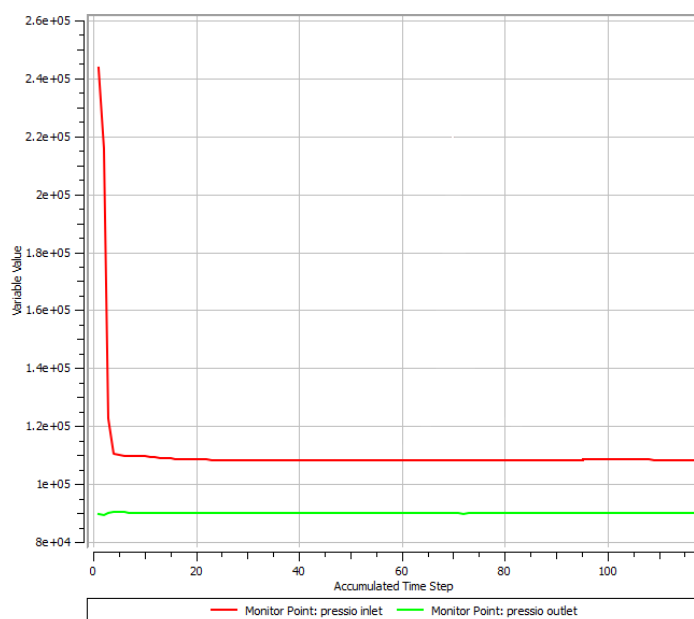
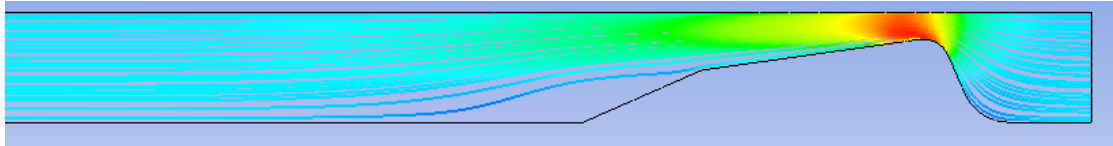


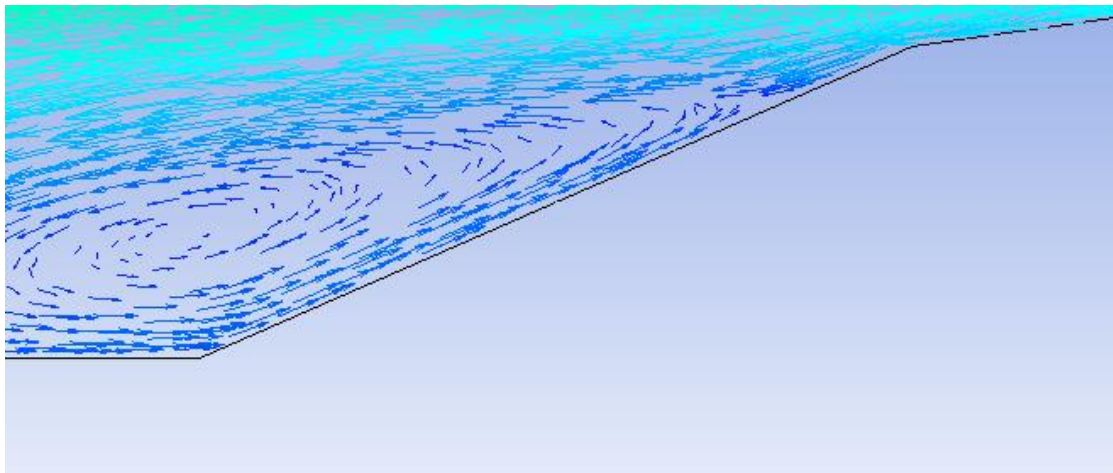
Figura 5.33 Gràfic de les pressions per a una cavitació intermèdia

La dificultat per convergir, de la mateixa manera que amb cavitació curta, cada cop es més patent. Els residus novament s'estabilitzen al final de la simulació i es compreenen entre els valors  $10^{-3}$  i  $10^{-4}$ . Degut al fenomen de cavitació, que ara apareix en major mesura, el sistema cada cop li costa més comportar-se de manera permanent. Si més no, s'aconsegueix un comportament estable finalment. Pel que fa a les pressions, és mantenen constants durant tota la simulació.

Pel que fa a les propietats físiques d'interès:



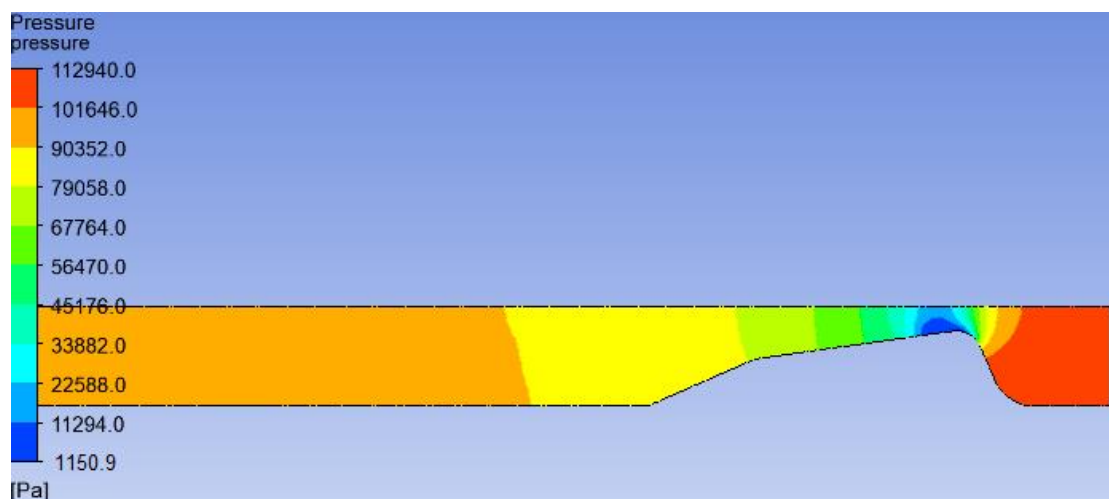
*Figura 5.34* Línies de corrent per a una cavitació intermèdia



*Figura 5.35* Vòrtex generat pel desprendiment de la capa límit per a una cavitació intermèdia

Seguint amb la tendència dels casos anteriors, el desprendiment de capa límit provoca una zona de turbulència posterior a la separació de la línia de corrent.

La pressió imposada al outlet és menor que amb anterioritat, conseqüentment la pressió mínima decau, i la quantitat de cavitació generada és major.



*Figura 5.36 Distribució de pressions per a una cavitació intermèdia*

En el punt on es comença a generar la cavitació, es troba la Pressió mínima que ha decaigut fins als 1150,9 Pa, menor que en el cas anterior. Òbviament, a menor Pressió del "outlet" menys pressió s'assoleix. A la sortida del Venturi, la pressió segueix baixant a conseqüència de la pressió al "Outlet" que ara és menor.

Comparant les dues imatges sobre l'estela obtinguda per el volum de vapor generat:



*Figura 5.37 Cavitació intermèdia generada al laboratori*

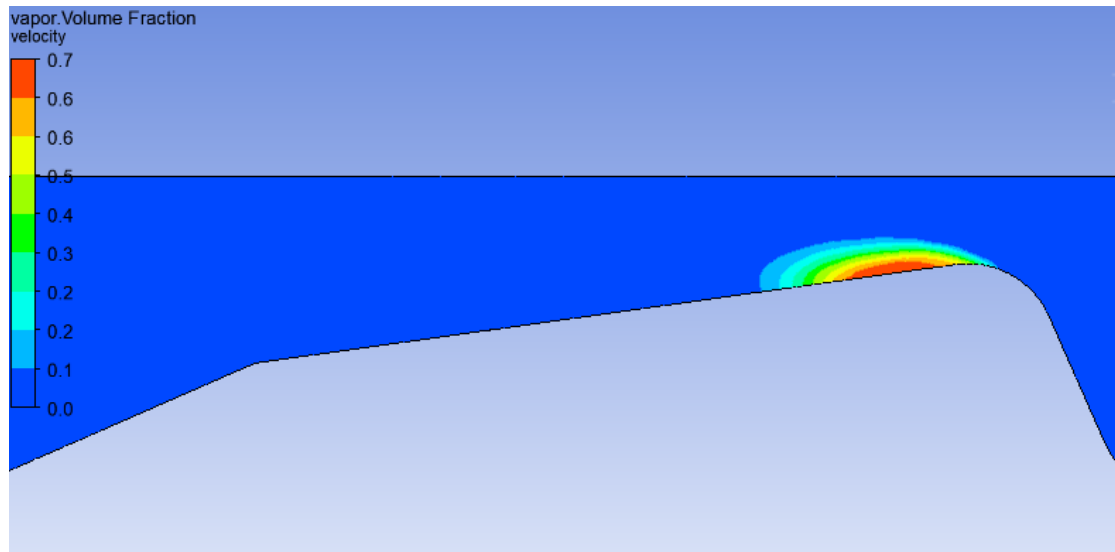


Figura 5.38 Cavitació intermèdia generada pel CFX

La formació de volum de vapor ha augmentat considerablement. Les regions amb més presència de vapor, on el valor de la fracció d'aquest respecte al líquid arriba a un 0.7, se situen al punt de velocitat màxim i per tant de pressió mínima com era d'esperar. La comparació entre la simulació computacional i l'obtinguda experimentalment determina que la simulació realitzada reproduïx amb exactitud el model real de cavitació. En aquest cas les pressions obtingudes són:

- $P_{\text{inlet}} = 108,7 \text{ kPa}$
- $P_{\text{outlet}} = 90 \text{ kPa}$
- $P_{\text{mínima}} = 1150,9 \text{ Pa}$

#### 5.3.5.1.4 Pressió baixa amb cavitació llarga.

Els últims casos són de cavitacions més llargues i amb una generació de volum de vapor molt gran. L'aparició d'aquest vapor, complica les simulacions degut al comportament transitori de les bombolles, la formació de les quals no és permanent. Això comporta més problemes per a convergir la solució. Establirem uns marges a partir dels quals considerarem que els residus ja són suficientment estables per dotar de fiabilitat la simulació.

El valor dels gràfics residuals són:

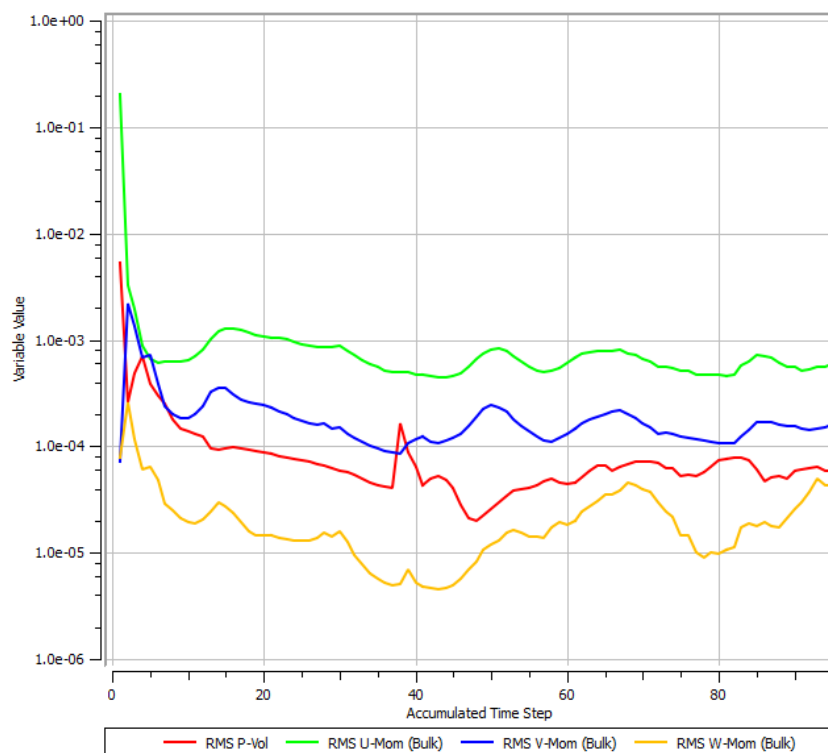


Figura 5.39 Gràfic dels residus per a una cavitació llarga

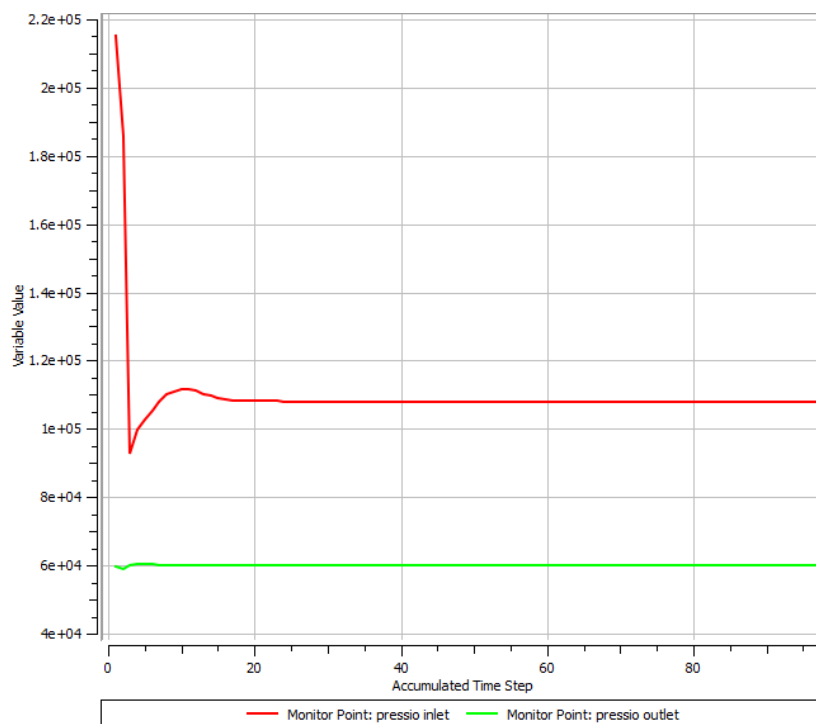
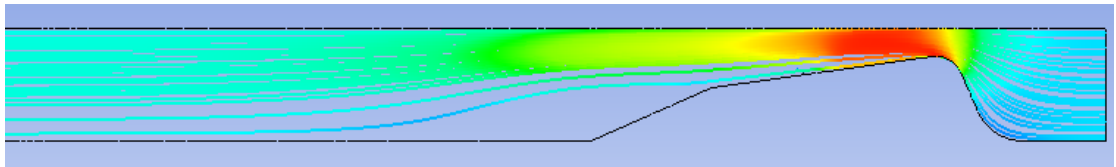


Figura 5.40 Gràfic de pressions per a una cavitació llarga

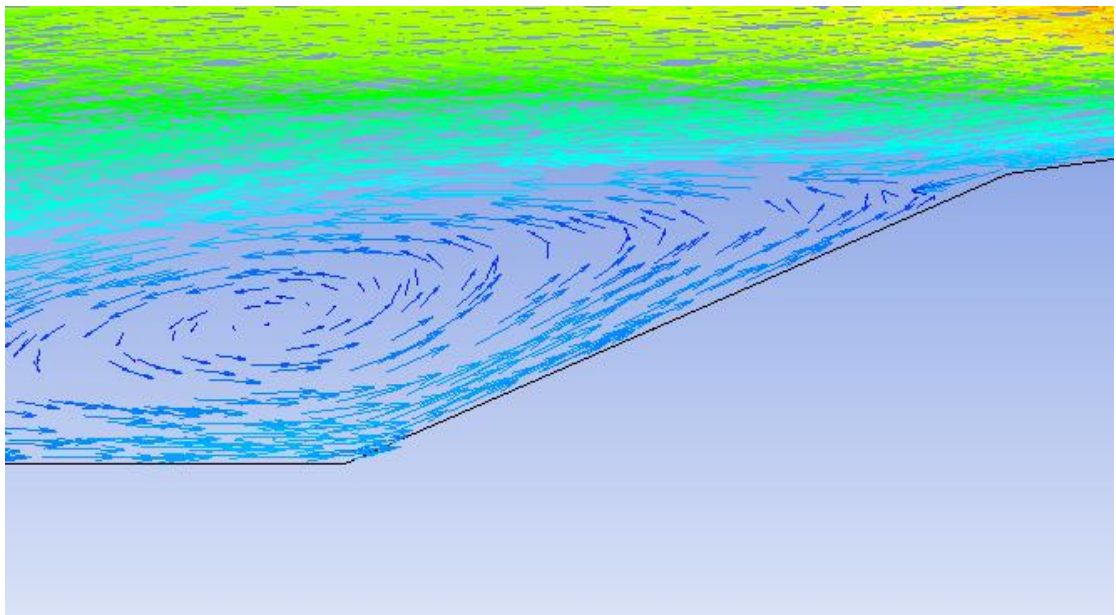


Com era d'esperar, els residus segueixen una tendència oscil·latòria, la qual fluctua entre valors del ordre de  $10^{-3}$  i  $10^{-4}$ . Aquest comportament fa pensar que, en essència, el sistema és transitori. De la mateixa manera que s'ha justificat fins ara, es considera que els valors han arribat a un comportament estable i associable a un règim permanent. Les pressions es mantenen constants durant tot el procés de la simulació.

Els gràfics que se'n deriven d'aquesta simulació són:

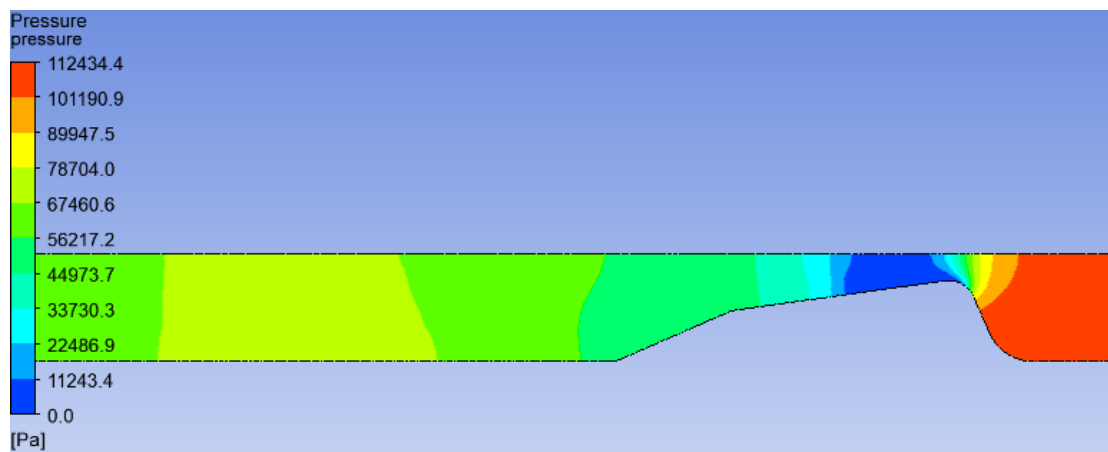


*Figura 5.41* Línies de corrent per a una cavitació llarga



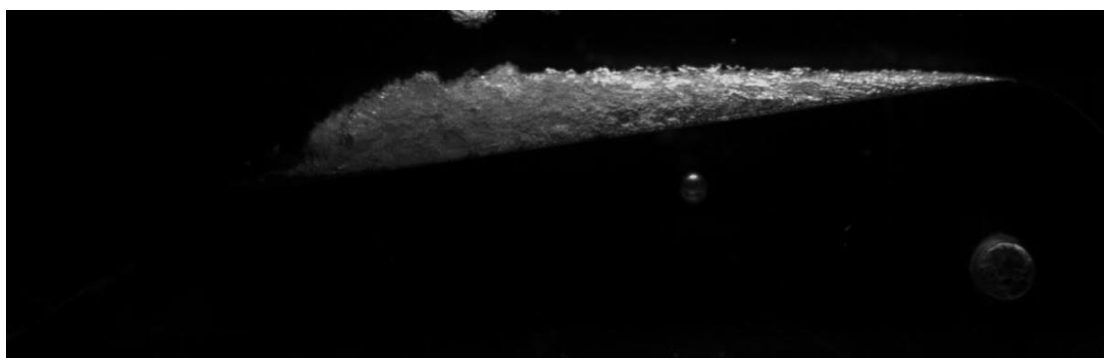
*Figura 5.42* Vòrtex generat pel desprendiment de la capa límit per a una cavitació llarga

El vòrtex que es crea cada cop és més gran. S'observa que la recirculació del fluid arriba fins al canvi de pendent del Venturi i, per tant, que el desprendiment de la capa límit es produeix molt abans que en casos anteriors.

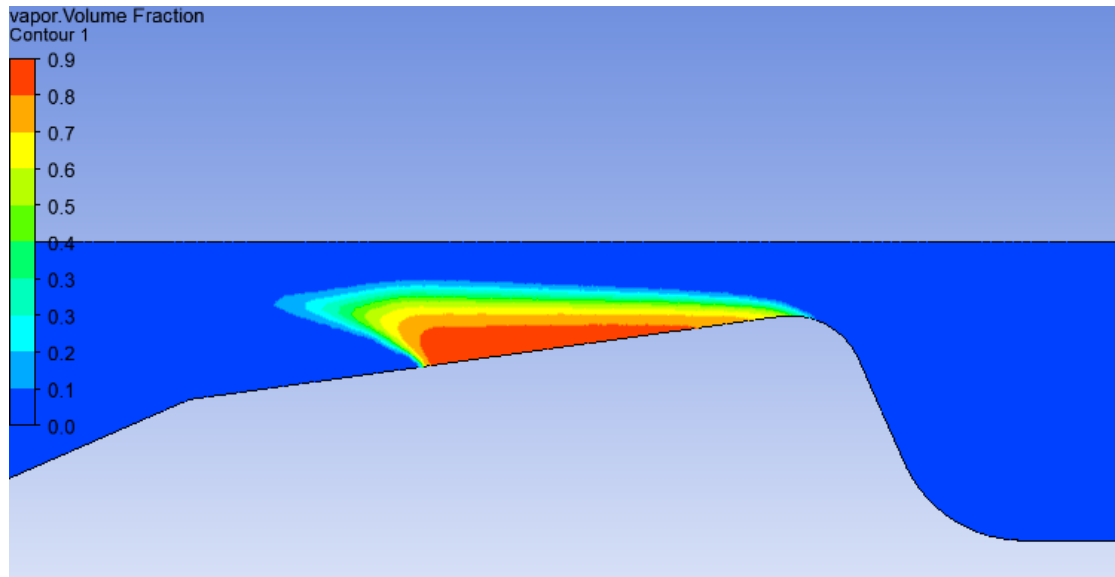


*Figura 5.43* Distribució de pressions per a una cavitació llarga

Les pressions mínimes assolides a la zona de màxima velocitat són properes a 0 Pa. Aquesta regió de pressió mínima ocupa un espai relativament gran en comparació amb simulacions anteriors, i per conseqüent, una formació de cavitació també més gran. La comparativa de la cavitació resulta:



*Figura 5.44* Cavitació llarga generada al laboratori



*Figura 5.45 Cavitació llarga generada al laboratori*

La generació de cavitació en aquestes condicions de pressió baixa resulta enorme. Es troba una fracció de vapor d'un 0,8 prop de la paret on es produeixen altes velocitats i les pressions més baixes. L'estela creada pel la barreja de vapor i líquid és molt considerable i representa amb molta precisió l'obtinguda al laboratori. Les pressions obtingudes són:

- $P_{\text{inlet}} = 107,9 \text{ kPa}$
- $P_{\text{outlet}} = 60 \text{ kPa}$
- $P_{\text{mínima}} = 0 \text{ Pa}$  (en algun punt en concret de la gola)

#### 5.3.5.1.5 Pressió mínima amb cavitació màxima.

Per últim es busca el punt de pressió mínima del "Outlet", on la cavitació generada és màxima. S'ha de tenir en compte que una generació excessiva de cavitació provoca que el model estacionari no sigui capaç de trobar una solució. Els residus han de romandre estables entre els mateixos paràmetres anteriors, i les pressions també. Tot el que no compleixi aquestes premisses, no és vàlid, fet que provoca una restricció en la pressió mínima admissible per el model.

Els residus per aquest valor màxim admissible de cavitació són els següents:

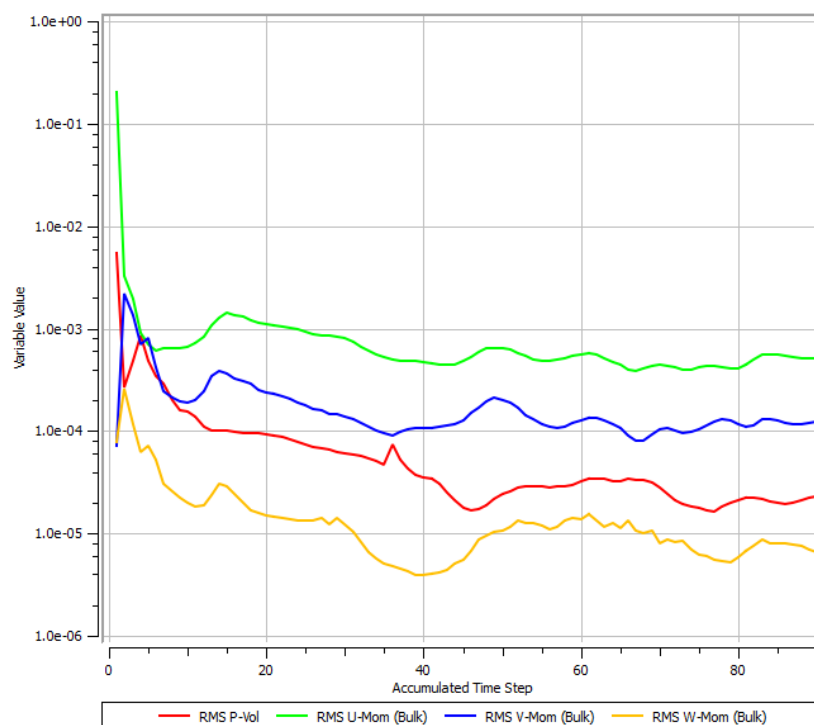


Figura 5.46 Gràfic dels residus per a una cavitació màxima

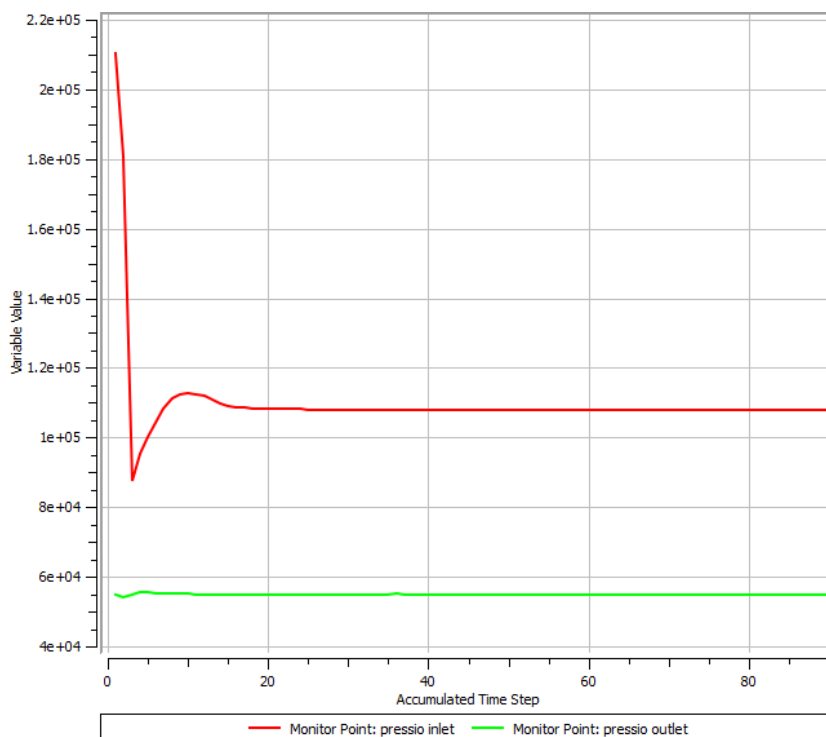


Figura 5.47 Gràfic de pressions per a una cavitació màxima

En aquest cas, la tendència dels residus són molt semblants a l'anterior simulació. Un comportament oscil·lant que es comprèn entre els valors  $10^{-3}$  i  $10^{-4}$ . Donat que s'ha definit aquest límit com a suficient per considerar que el flux es pot assimilar a un flux permanent i que les pressions romanen estables, es dona validesa a la última simulació. És moment doncs d'utilitzar el CFX-Post per a visualitzar el comportament del fluid a través del domini de control.

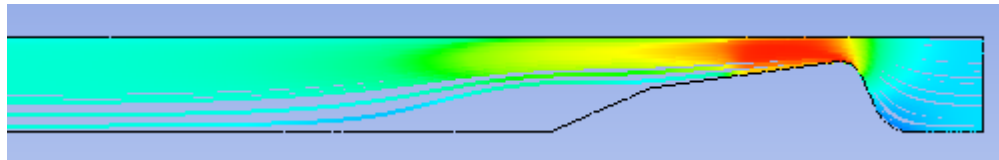


Figura 5.48 Línies de corrent per a una cavitació màxima

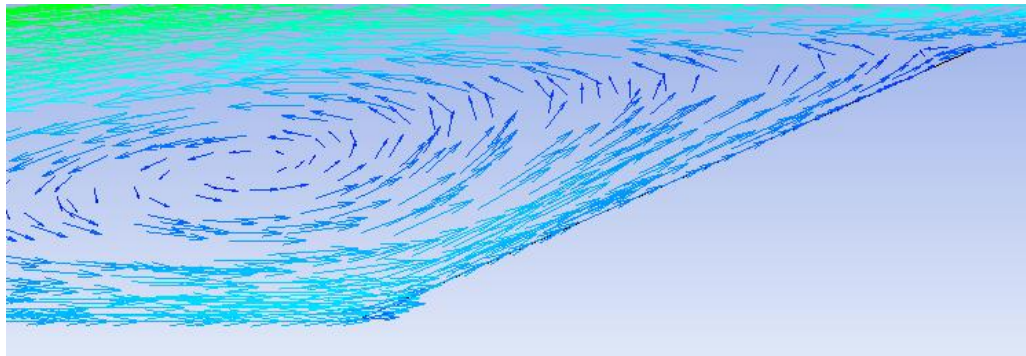


Figura 5.49 Vòrtex generat pel despreniment de la capa límit per a una cavitació màxima

L'últim cas d'estudi proporciona uns resultats sobre la capa límit que segueixen la tendència anterior. És cert però, que en aquest punt, el vòrtex creat és el més gran de totes les casuístiques anteriors.

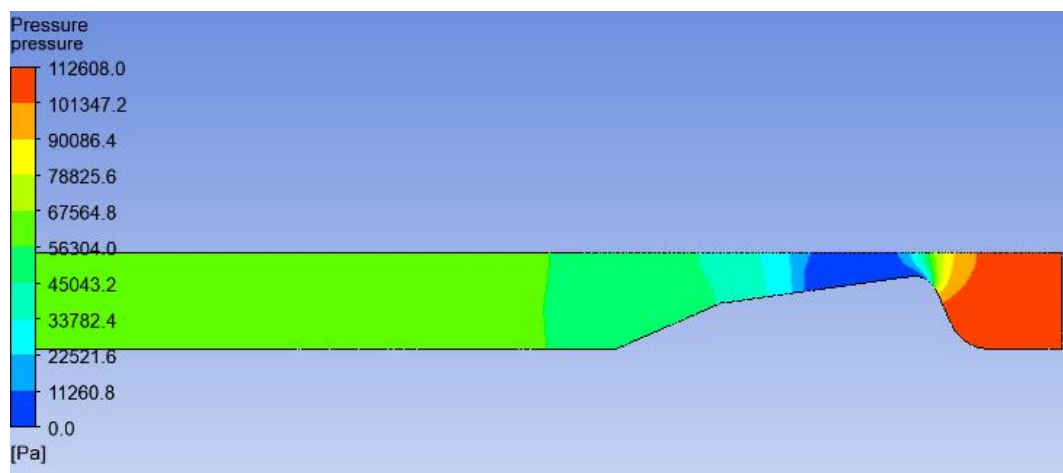
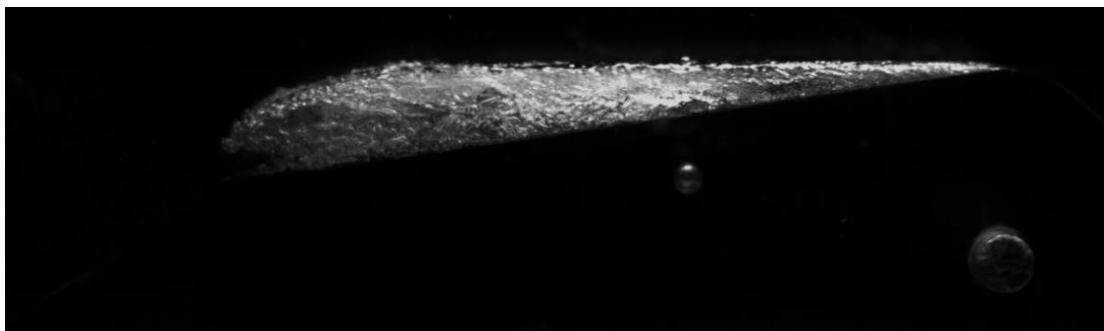


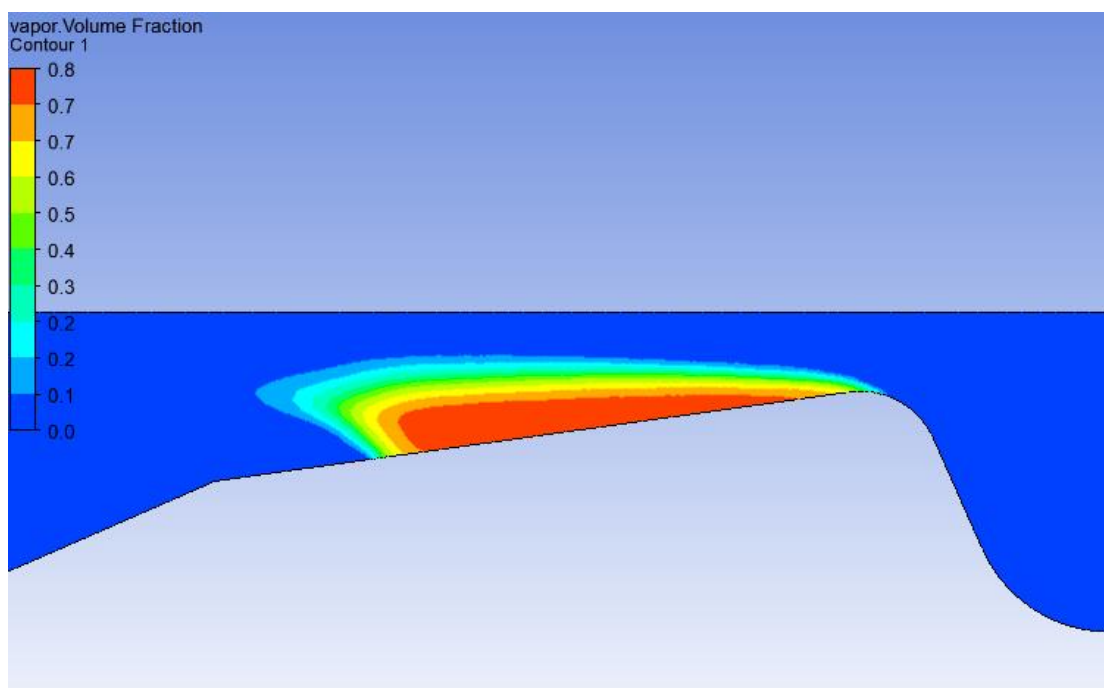
Figura 5.50 Distribució de pressions per a una cavitació màxima

Les pressions després del Venturi resulten ser les més baixes assolides fins ara. Això es conseqüència de la imposició de pressió mínima a la sortida del domini, com ja s'ha comentat en múltiples ocasions.

L'estela generada pel volum de vapor és:



*Figura 5.51 Cavitació màxima generada al laboratori*



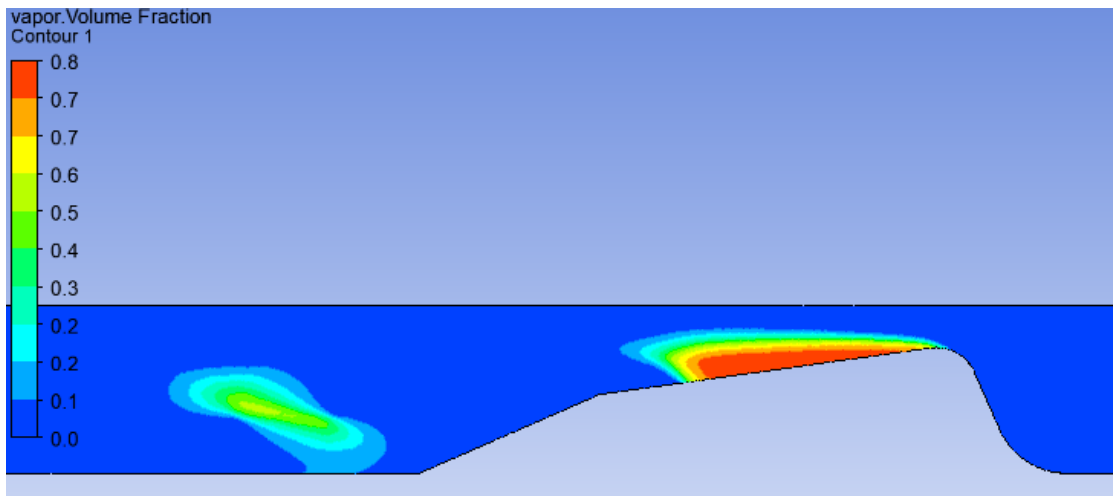
*Figura 5.52 Cavitació màxima generada pel CFX*

La cavitació en aquest punt és màxima, la formació de vapor s'estén fins a l'augment més pronunciat del Venturi i, per tant, punt a partir del qual hi ha una pujada en la pressió i novament la condensació del vapor.

Les pressions obtingudes en aquest últim assaig han estat:

- $P_{\text{inlet}} = 107,3 \text{ kPa}$
- $P_{\text{outlet}} = 55 \text{ kPa}$
- $P_{\text{mínima}} = 0 \text{ Pa}$  (en algun punt en concret de la gola)

L'aplicació d'una pressió més baixa que la obtinguda en la darrera simulació, provoca l'aparició de cavitació també en el deixant posterior i la formació de núvols de cavitació en el vòrtex .

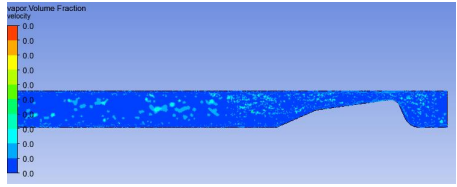

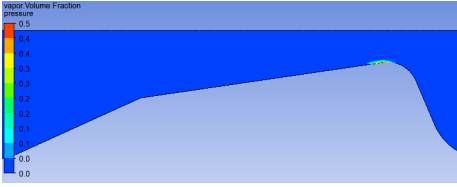

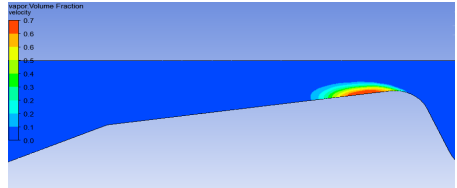
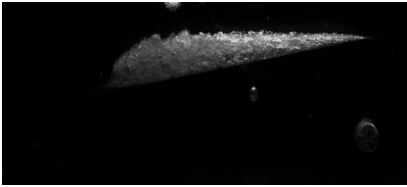
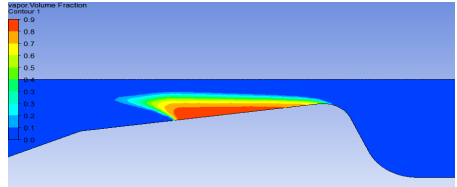
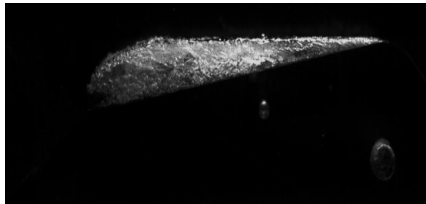
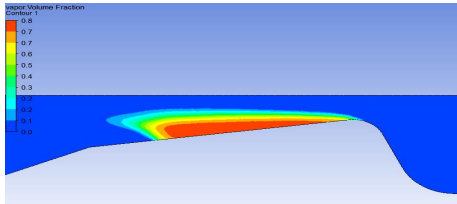
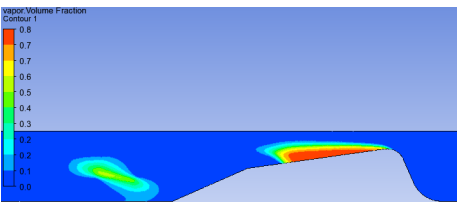


*Figura 5.53* Cavitació a la gola i al deixant calculada pel CFX per pressions molt baixes

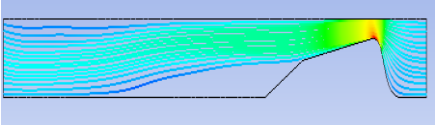
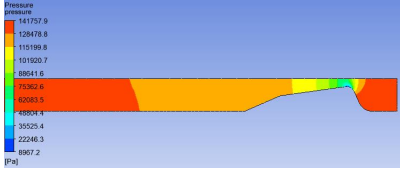
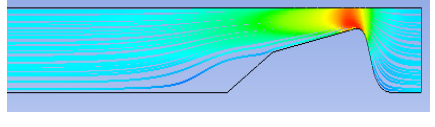
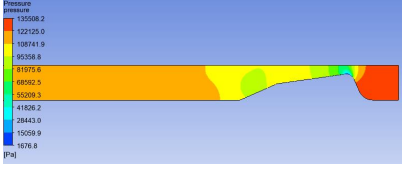
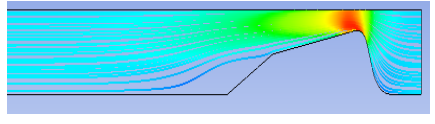
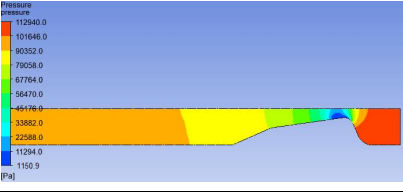
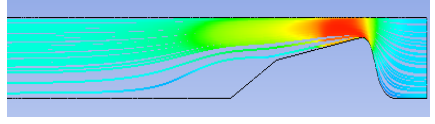
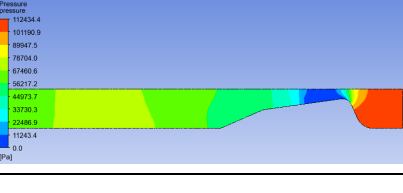
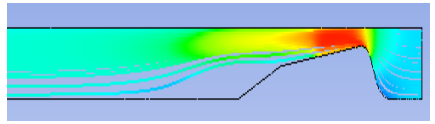
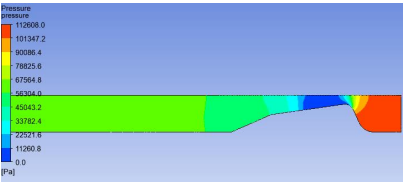
Amb aquest, queden reproduïts computacionalment els 5 casos proposats inicialment.

## 6. Comparació i discussió de resultats

A continuació es mostra una taula resum de les simulacions realitzades a l'estudi:

Tipus de cavitació	Cavitació al laboratori	Cavitació al CFX
Sense cavitació	No s'ha realitzat al laboratori al no haver-hi cavitació	
Cavitació curta		
Cavitació intermèdia		
Cavitació llarga		
Cavitació màxima		
Cavitació a la gola i al deixant	No es disposa d'imatge al laboratori	



Tipus de cavitació	Línies de corrent	Perfil de pressions
Sense cavitació		
Cavitació curta		
Cavitació intermèdia		
Cavitació llarga		
Cavitació màxima		

Taula 6.2 Comparativa de línies de corrent i distribució de pressions

Es conclou que el fenomen de cavitació s'ha simulat amb èxit, comparant els resultats computacionals amb les proves fotogràfiques al laboratori.

Pel que fa a les línies de corrent, es veu clarament com la velocitat assolida a la gola del Venturi és cada cop més i més gran. L'explicació és clara, la disminució de pressió provoca un augment de velocitat i conseqüentment una cavitació major.

Fent referencia a la capa límit, s'observa com en el cas de no tenir cavitació l'estela del flux és molt més homogènia i suau, seguint una trajectòria corba molt refinada fins arribar novament al perfil del domini.

En canvi, l'aparició de cavitació, provoca un canvi del comportament de la capa límit. Es pot veure també una trajectòria més brusca de les línies de corrent i no tan moderada com en el cas de no cavitació.

Per últim, referent a la pressió, s'obté una distribució de pressions on cada cop els valors obtinguts són més baixos. Aquest comportament és l'esperat, degut a que la pressió aplicada a les condicions de contorn també disminueix en cada cas. Fent accent a la gola del Venturi, es troben unes pressions mínimes que en cada cas ocupen una regió major, fet que explica l'aparició d'una fracció de volum de vapor cada cop més gran.

Definitivament els resultats obtinguts a l'estudi compleixen les expectatives que inicialment s'havien plantejat i per tant que permeten extreure unes conclusions dotades de validesa envers el comportament real del sistema.

## 7. Programació

A continuació es fa referència a la taula 7.1 on es troba cadascuna de les activitats que conformen la realització del projecte.

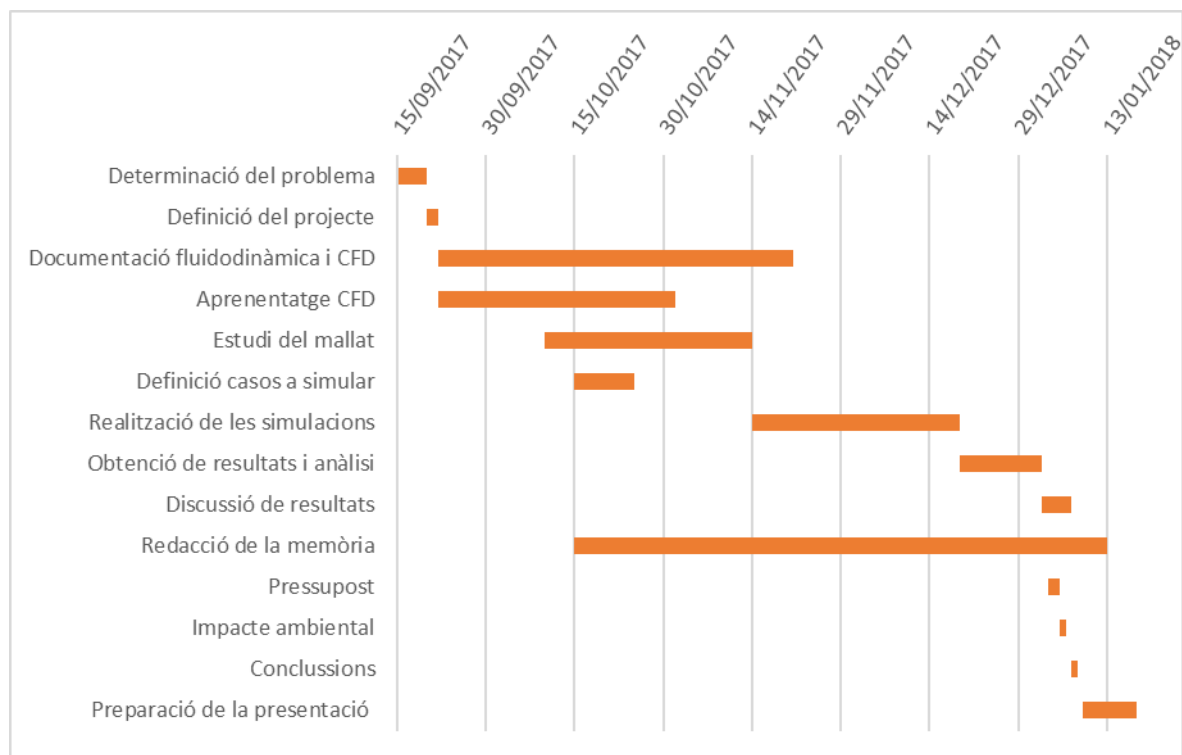
<i>Activitat</i>	<i>Inici</i>	<i>Duració [dies]</i>	<i>Final</i>
Determinació del problema	15/09/2017	5	20/09/2017
Definició del projecte	20/09/2017	2	22/09/2017
Documentació fluidodinàmica i CFD	22/09/2017	60	21/11/2017
Aprenentatge CFD	22/09/2017	40	01/11/2017
Estudi del mallat	10/10/2017	35	14/11/2017
Definició casos a simular	15/10/2017	10	25/10/2017
Realització de les simulacions	14/11/2017	35	19/12/2017
Obtenció de resultats i anàlisi	19/12/2017	14	02/01/2018
Discussió de resultats	02/01/2018	5	07/01/2018
Redacció de la memòria	15/10/2017	90	13/01/2018
Pressupost	03/01/2018	2	05/01/2018
Impacte ambiental	05/01/2018	1	06/01/2018
Conclusions	07/01/2018	1	08/01/2018
Preparació de la presentació	09/01/2018	9	18/01/2018

<b>Inici projecte</b>	15/09/2017
<b>Final projecte</b>	18/01/2018

*Taula 7.1* Programació del projecte

A partir de la taula on figuren les etapes del projecte, amb les dates d'inici i les pertinent duracions de cada activitat, es passa a la realització d'un diagrama de Gantt corresponent a la *Figura 7.1*. D'aquesta manera es pot observar amb claredat aquelles activitats que requereixen de més temps per a la seva realització i aquelles que menys.

En el cas concret d'aquest projecte es poden definir 5 activitats que ocupen la major part del temps emprat en la realització total: Documentació fluidodinàmica i CFD, aprenentatge CFD, estudi del mallat, realització de simulacions i la redacció de la memòria.



*Figura 7.1 Programació del projecte*

## 8. Pressupost

Per tal de realitzar el pressupost del treball es tenen compte els costos els quals tindria una empresa si poses en marxa el projecte. Els costos es discretitzaran en costos directes i costos indirectes.

### 8.1. Costos directes

Cal esmentar que degut a que aquest projecte es basa pràcticament en la seva totalitat en un estudi computacional d'un cas de laboratori, els costos associats majoritaris estaran associats a les hores invertides en aquest anàlisi. Aquestes hores han estat invertides en totes les etapes del projecte i s'estimen a un total de hores de 460 h (1,5 h al dia de mitja).

Un enginyer junior ha tingut un sou mig de 25000 € l'any, dades de la Vanguardia per a l'any 2017, per un total de 1760 h treballades aproximadament (220 laborables, descomptant 20 dies de vacances). A aquest cost se li ha de sumar un 30% corresponent a la Seguretat Social. Finalment determinem que el cost que resulta de la contractació d'un enginyer junior és de 18,47 €/h.

S'han d'afegir tots els costos d'oficina derivats de la realització del projecte. Dins d'aquest concepte es considera: paper, bolígrafs, llapis, impressora, l'ordinador i les llicències dels programes emprats.

Per a calcular els costos del software i de l'ordinador es tenen en compte els següents temps d'amortització:

- Ordinador: 3 anys
- Solidworks: 2 anys
- Ansys: 2 anys

Es tenen en compte una utilització del ordinador, el Solidworks i l'ANSYS de 25 h per setmana.

<i>Concepte</i>	<i>Temps invertit (h)</i>	<i>Cost (€/h)</i>	<i>Total (€)</i>
Documentació i aprenentatge CFD	100	18,47	1847,00
Costos indirectes	100	18,47	1847,00
Redacció memòria	95	18,47	1754,65

Concepte	Cost d'adquisició (€)	Vida útil (h)	Utilització (h)	Total (€)
Material d'oficina	-	-	-	150,00
Ordinador	3500,00	3900	445	400,00
Llicència Solidworks	6000	2600	5	11,54
Llicència ANSYS	30000,00	2600	300	3461,54
<b>COST TOTAL</b>				<b>9471,73</b>

Taula 8.1 Costos directes desglossats

## 8.2. Costos indirectes imputables

En aquest apartat es tenen compte aquells costos que van lligats als costos materials i se'n deriven d'aquests. S'imputen les despeses energètiques degudes a la utilització de material informàtic, així com la despesa en internet.

Concepte	Consum (kW)	Utilització	Preu unitari	Total (€)
Consum elèctric	0,2	445 h	0,13 €/kw·h	11,57
Consum d'Internet	-	5 mesos	36,80 €/mes	184,00
<b>COST TOTAL</b>				<b>195,57</b>

Taula 8.2 Costos indirectes desglossats

## 8.3. Costos total del projecte

A part dels costos indirectes imputables es troba un concepte de cost indirecte el qual no es pot imputar directament en les despeses. Aquests són referits per exemple, al cost del lloguer d'un local, subministració de bens de primera necessitat, manteniment de les instal·lacions, costos dels departaments de comptabilitat o administració entre d'altres...

Aquests costos no imputables representen un percentatge acordat amb l'empresa que duu a terme la realització del projecte.

A part s'aplica un marge de beneficis per al projecte. El cost total assolit per el projecte és el següent:

<i>Concepte</i>	<i>Percentatge (%)</i>	<i>Cost (€)</i>
Costos directes	-	9471,73
Costos indirectes	-	195,57
<b>Total costos imputables</b>	-	<b>9667,3</b>
Costos indirectes no imputables	12	1160,08
Marge de benefici	7	676,71
<b>Total costos no imputables</b>	-	<b>1836,79</b>

<b><i>COST TOTAL del PROJECTE</i></b>	<b>11504,09</b>
---	-----------------

*Taula 8.3* Costos totals del projecte desglossats

## 9. Impacte mediambiental

Tota realització d'un projecte implica un impacte en el medi ambient o en la societat. En major o menor mesura depenent del tipus d'actuacions que requereix el projecte.

Per a la realització de l'estudi durant el projecte es necessari la utilització de certs recursos naturals. Però cal tenir clar que el tipus de projecte que s'ha plantejat no té un impacte en el medi físic o natural de gran consideració, més bé tot el contrari. Per a tenir en compte el petit impacte que pot arribar a tenir aquest projecte, es té en compte el consum d'energia elèctrica amb les conseqüents emissions de CO<sub>2</sub> i el consum de paper necessari per a la elaboració de tota la documentació.

Per valorar el consum de CO<sub>2</sub> es considera que 1kW·h genera 0,399 kg de CO<sub>2</sub>, dades aportades pel Ministerio de Industria, Energia y Turismo al 2016.

Concepte de consum	Utilització (h)	Potència (W)	Consum d'energia kW·h	Consum de CO <sub>2</sub> (kg)
Ordinador	445	200	89	35,51
Lluminària	445,00	100	45	17,76
<b>EMISSIONS CO<sub>2</sub></b>				<b>53,27</b>

Taula 9.1 Emissions totals de CO<sub>2</sub> per consum elèctric

Per a fer una estimació del consum de material en paper que s'ha realitzat, tenint en compte la equivalència de que 60 kg de paper equivalen a 1 arbre que proporciona la :

Concepte de consum	Utilització (Fulls)	Gramatge (g/m <sup>2</sup> )	Area (m <sup>2</sup> )	Pes (kg)
Paper	200	90	0,0624	1,12
<b>Equivalent en arbres</b>				<b>0,019</b>

Taula 9.2 Arbres emprats per al consum de paper





## Conclusions

L'experiència personal durant la realització del projecta ha estat molt enriquidora. Els coneixements assolits durant aquest període de temps han estat d'un valor enorme i d'una utilitat encara major. Els objectius plantejats a l'inici del treball han estat complerts. La utilització del software CFX i el programari CAD ha permès dur a terme les simulacions definides, observar múltiples paràmetres d'interès derivats de l'estudi i aprendre a definir un model per simular un cas concret:

- Validar un model de simulació a partir de la comparació amb una solució real tenint en compte el comportament dels residus que donen validesa al resultat final.
- Entendre la importància d'un bon mallat per a l'obtenció de resultats fiables amb el menor consum de recursos.
- Observar la influència de la pressió en la generació de cavitació en un tub Venturi.
- Observar el comportament de la velocitat d'un fluid resseguint un perfil variable i les línies de corrent generades.

Entrant més profundament en el treball i les simulacions en sí:

- La pressió assolida al domini de control disminueix a conseqüència de la disminució de pressió al "outlet".
- La velocitat màxima a la gola del venturi és major a mesura que la pressió disminueix ja que apareix la cavitació que bloqueja la secció de pas.
- La cavitació produïda va lligada directament a les pressions baixes generades a la zona d'estretament màxim del Venturi.
- Per a una conservació de la massa en el sistema, és necessari adaptar el domini computacional a un domini fictici (més llarg a la sortida) per tal que la solució convergeixi i els residus es mantinguin fluctuant mínimament a valors baixos.
- Un sistema transitori es pot analitzar com un sistema estacionari si els residus es mantenen estables o oscil·lant entre valors constants i al voltant de  $10^{-3}$  i  $10^{-4}$ .
- A partir d'un punt de cavitació màxima el sistema no es pot assimilar a un comportament estacionari ja que una cavitació molt alta provoca fluctuacions molt grans en els residus i un comportament inestable del sistema.

Per a la continuació d'aquest projecte en moments futurs seria molt interessant veure com varien els resultats de la distribució de pressions, velocitats i la cavitació generada per a geometries diverses adaptades a un tub de Venturi. Es podria tractar d'optimitzar la geometria del Venturi per tal de generar una cavitació més controlada i de dimensions més grans si fos necessari. També podria resultar un valor afegit el fet d'intentar fer una simulació 3-D del domini per a observar si les parets laterals influeixen en gran mesura o no en els resultats obtinguts experimentalment.

## Agraïments

Voldria agrair als meus tutors, Xavier Escaler i David Bermejo, el fet d'oferir-me la possibilitat d'endinsar-me en aquest projecte al qual hem estat lligats aquests mesos. A nivell acadèmic ha resultat ser un pas endavant en molts dels aspectes més interessants per a mi, però no només això, a nivell merament personal ha suposat un gran repte i una gran satisfacció la realització d'aquest treball.

La dedicació per part dels meus tutors ha estat enorme, resolent tots els dubtes que m'han sorgit durant la realització del projecte i dedicant hores per a la solució de tots els contratemps que han anat sortint.

Com no, arribat a aquest punt, agrair a tota la gent que a estat amb mi, no només durant la aquests 4 mesos, sinó amb aquells que m'han acompanyat durant aquests anys.

## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

- [1] ENCICLOPEDIA CATALANA, *Hidrodinàmica* [Consulta: 15/09/2017]  
< <http://www.enciclopedia.cat/EC-GEC-0187510.xml>>
- [2] BERNOULLI, DANIEL. *Hydrodynamica, sive de viribus et motibus fluidorum commentarii*, 1738.
- [3] UNIVERSITAT MENDELU DE BRNO, *Propietats dels fluids* [Consulta: 17/09/2017]  
< [http://web2.mendelu.cz/af\\_291\\_projekty2/vseo/files/202/13113.pdf](http://web2.mendelu.cz/af_291_projekty2/vseo/files/202/13113.pdf)>
- [4] FRANK M. WHITE, *Mecánica de fluidos, Sexta Edición 2008 McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U* [Consulta: 18/09/2017 ]
- [5] FÍSICA PROYECTO, *Revista Mecánica de fluids* [Consulta: 18/09/2017 ]  
< <https://fisicaproyecto.wordpress.com/flujos/>>
- [6] UNIVERSIDAD EIA, *Classificació del flux* [Consulta: 20/09/2017 ]
- [7] HERNAN LEON, *Efecte Venturi* [Consulta: 28/09/2017 ]  
<<https://hernanleon1002.wordpress.com/fisica-de-fluidos-y-termodinamica/segundo-corte/marco-teorico/efecto-venturi/>>
- [8] DAVID RODRIGUEZ, *Física, fluids y termodinàmica* [Consulta: 28/09/2017 ]
- [9] BIBLIOTECA ESCUELA SUPERIOR INGENIEROS DE SEVILLA, *Manual Dinàmica de fluids computacional* [Consulta: 05/10/2017 ]  
<<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+3.pdf>>

- [10] ANSYS HELP, *Cavitation model* [Consulta: 21/10/2017 ]
- [11] ANSYS HELP, *Turbulence model* [Consulta: 23/10/2017 ]
- [12] ANSYS GUIDE, *Mesh tools* [Consulta: 05/10/2017 ]
- [13] BIBLIOTECA ESCUELA SUPERIOR INGENIEROS DE SEVILLA, *Introducció al CFD*  
[Consulta: 31/10/2017 ]